



第1章 放大电路的建模与分析

之1 放大电路基础

本节主要讨论：

- 放大电路的基本概念及工作原理
- 放大电路的静态偏置及静态分析
- 三极管和场效应管的小信号模型
- 三种基本组态放大电路的动态分析

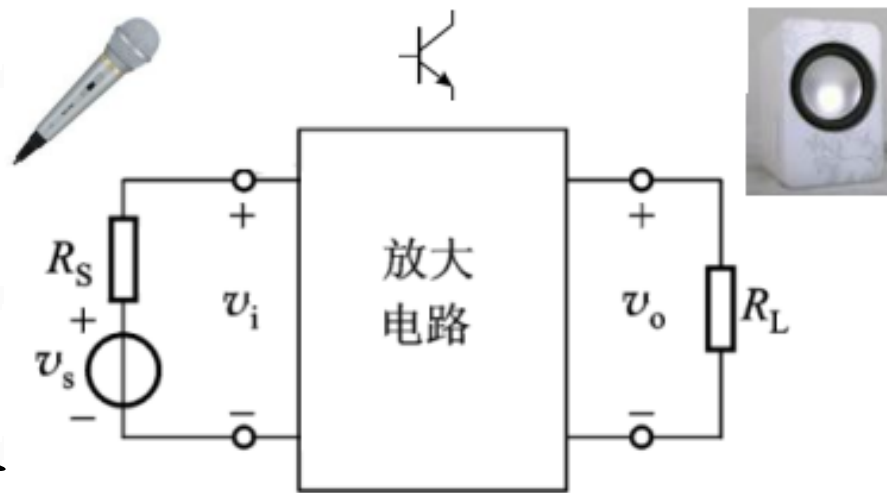


1.1 放大电路的基本概念

一、放大电路的基本组成

✧ 放大电路有时也称为放大器。在音响、电话机、门铃、测量电路（如测温度、压力、流量）、驱动电路等都用到放大电路。

- **输入**信号源：等效为含内阻的电压源
- **输出**负载：等效为 R_L
- **放大电路**核心：为晶体管或其构成的集成电路



音响放大电路



➤ 输入信号源

- ✧ 自然环境中，存在各种信号，如温度、压力、光强、声音、速度等。放大电路进行分析处理时，首先需要将这些非电量信号通过传感器转变为电信号，作为放大电路的输入信号源。
- ✧ 根据电路理论，信号源可以等效为戴维南电路（电压源型）或诺顿电路（电流源型）。
- ✧ 根据信号分析知识，实际的非正弦信号可以分解为不同频率的正弦信号的叠加。所以，放大电路分析中，通常将正弦信号作为基本的输入信号。



➤ 输出负载

- ✧ 输出负载通常是各种执行机构或下一级放大电路，如：电压表、电流表、扬声器、伺服电机。
- ✧ 负载对放大电路的要求一般分为三类：
 - **电压源输出**：要有足够大的输出电压，对输出电流没有要求（如电压表、下一级放大电路）。
 - **电流源输出**：要有足够大的输出电流，对输出电压没有要求（如继电器线圈）。
 - **功率输出**：要求输出电压和输出电流都有足够大的动态范围（如音箱）。

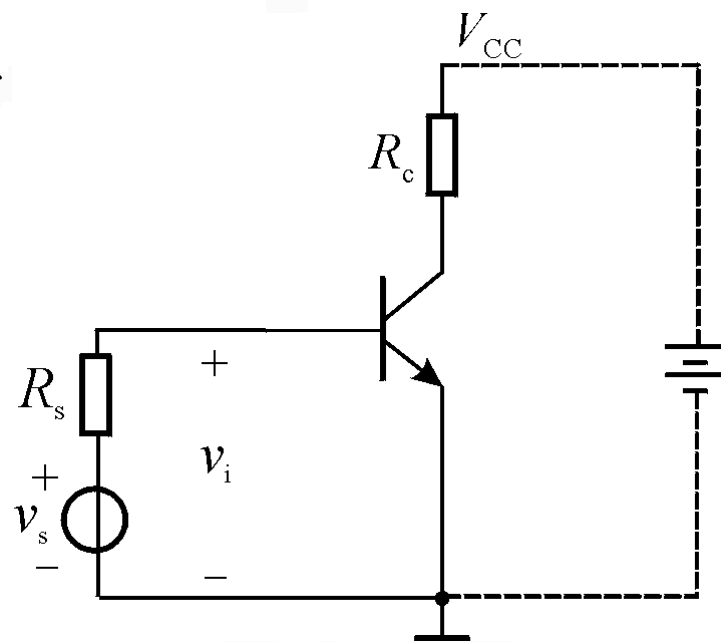
二、放大电路的放大原理

- 如何利用三极管将输入信号源的 10mV 放大到输出电压 1V ?

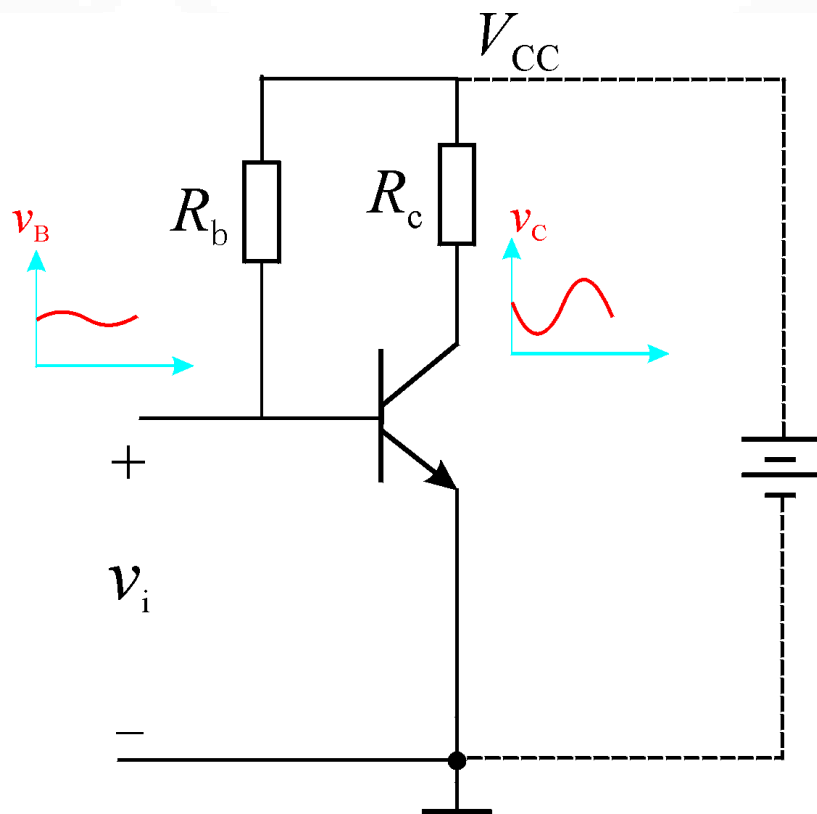


- ✧ 直接将输入信号加到三极管的基极会不会被放大?

- 通常输入信号很小，不足以使三极管导通。
- 即使输入信号足够大，其负半周不会被放大。

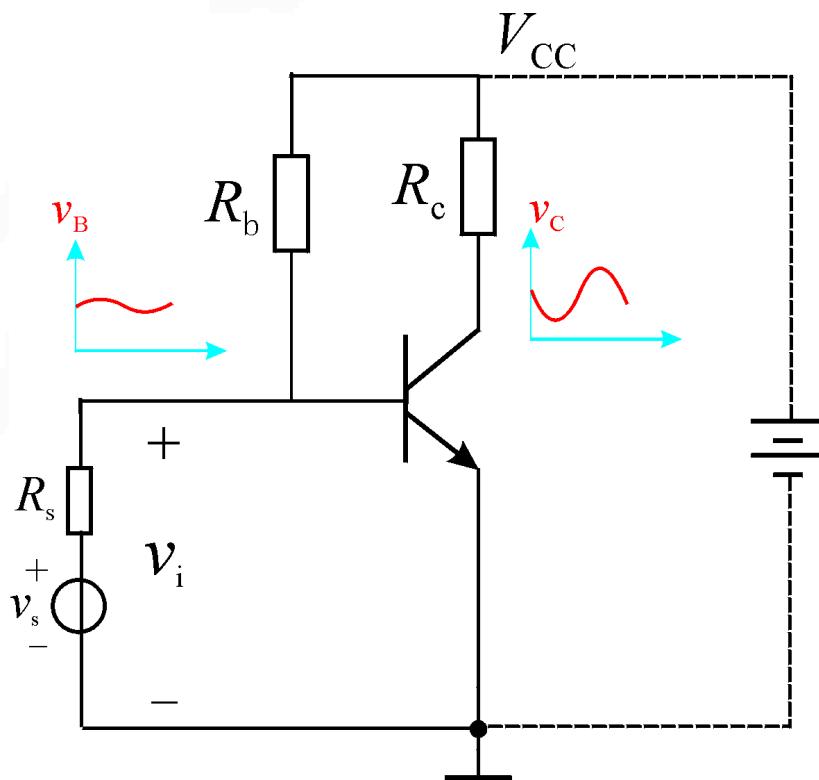


为了能输入信号被放大，应该先将三极管的基极电压加到使三极管导通（工作在放大区），称为**静态偏置**。因此，放大电路能正常工作的前提条件是有合适的静态偏置，即合适的**静态工作点**（简称为**Q点**）。





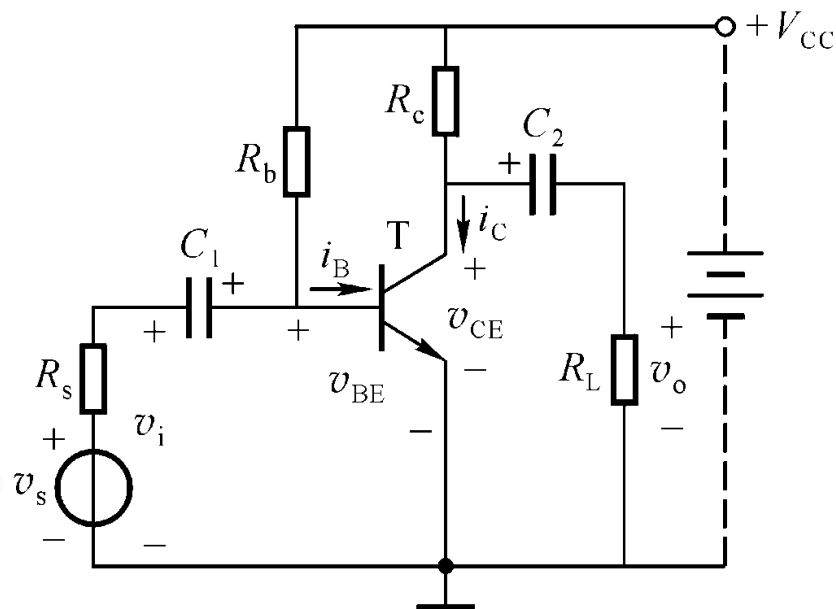
✧ 有了静态偏置后，能否直接将输入信号送到输入端进行放大？



由于信号源内阻 R_s 通常很小，基极电位被信号源拉低。因此电路不能正常工作。

为了使输入信号能加得进，应采取适当的**耦合**方式。通常利用电容的“**隔直流、通交流**”特性进行耦合。

同样，为了使负载上得到纯交流信号（如喇叭），也需要用电容隔离直流分量。



放大电路正常工作的前提条件是合适的**静态偏置**和**耦合方式**。合适的静态偏置使晶体管工作在放大状态；合适的耦合方式使信号能**加得进，取得出**。

➤ 放大原理

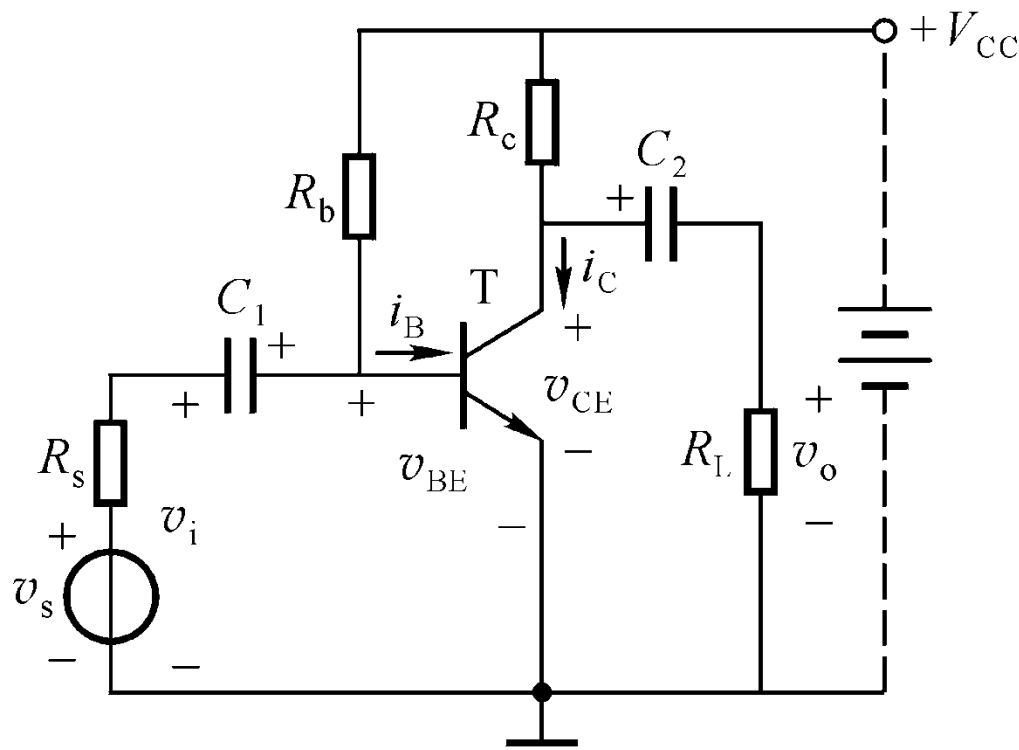
NPN管：放大器件，
核心元件。

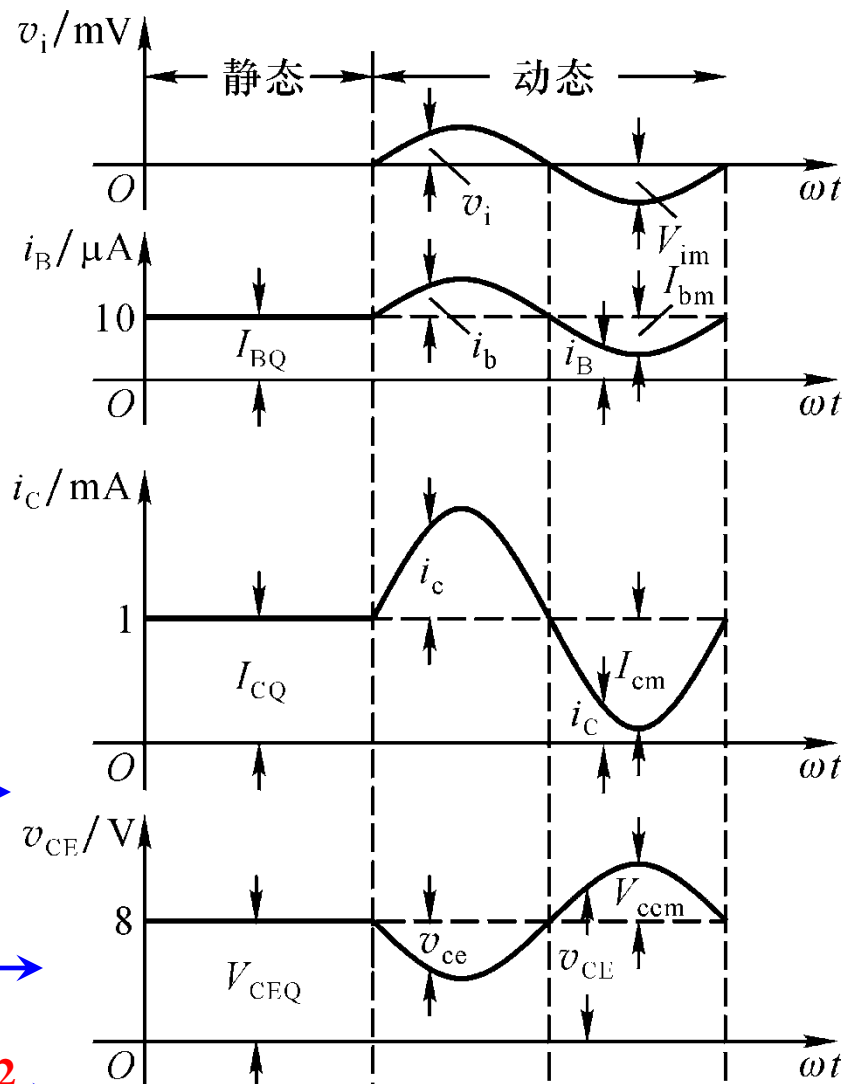
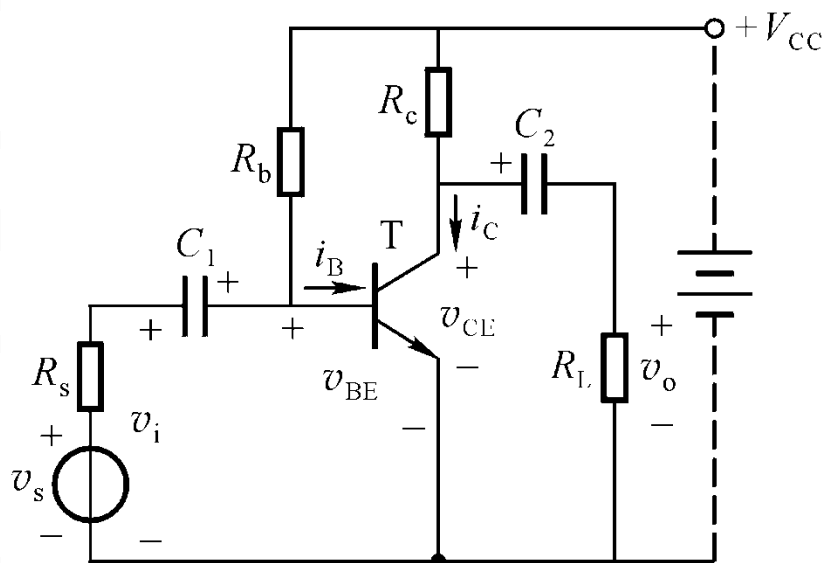
R_b 和 R_c ：提供适合偏置--发射结正偏，
集电结反偏。

C_1 、 C_2 ：耦合电容，
隔直流通交流。

v_s ， R_s ：信号源电压及内阻。

R_L ：负载电阻，将 Δi_C 转换为 Δv_{CE} 。





v_i 变化 通过 C_1 →

输入信号加到基极，使 i_B 变化 通过三极管 →

i_C 将 i_B 放大 ($i_c = \beta i_b$) 通过电阻 →

将 i_C 转化为电压变化 通过 C_2 →

将交流分量送到负载 ($v_o = v_{ce}$)



三、放大电路中静态与动态的关系

- ✧ 放大电路对信号的放大是利用**三极管的电流控制作用**来实现。
- ✧ 放大电路的最重要特点是**交直流共存**。在放大电路中，既有直流电源，又有交流信号源，因此，在放大电路中，既存在直流量（静态偏置值），又存在交流量（变化量）。
- ✧ 放大电路的分析，总是将直流量与交流量的计算分离开来，分为**直流分析（静态分析）**和**交流分析（动态分析）**。

➤ 符号表示

- 大写大下标: **直流量**, 如 I_B 、 I_{BQ} 、 V_{CEQ} 。
- 小写小下标: **交流量**, 如 i_b 、 v_{ce} 、 v_i 、 v_o 。
- 小写大下标: **瞬时量**, 如 i_B 、 v_{CE} 。
- 大写小下标: **交流量的有效值、峰值或峰峰值**, 如 I_b 、 V_o 、 V_{om} 、 V_{opp} 。

【示例】 $v_{CE} = 8 - 3\sin\omega t \text{ V}$ ➡ 瞬时量

$V_{CEQ} = 8 \text{ V}$ ➡ 直流量(静态分量)

$v_{ce} = -3\sin\omega t \text{ V} = v_o$ ➡ 交流量(动态分量)

$V_{ce} = V_o = 3/\sqrt{2} \text{ V}$ ➡ 交流分量的有效值

$V_{cem} = V_{om} = 3 \text{ V}$ ➡ 峰值



四、放大电路的图解分析

➤ 放大电路的两种分析方法

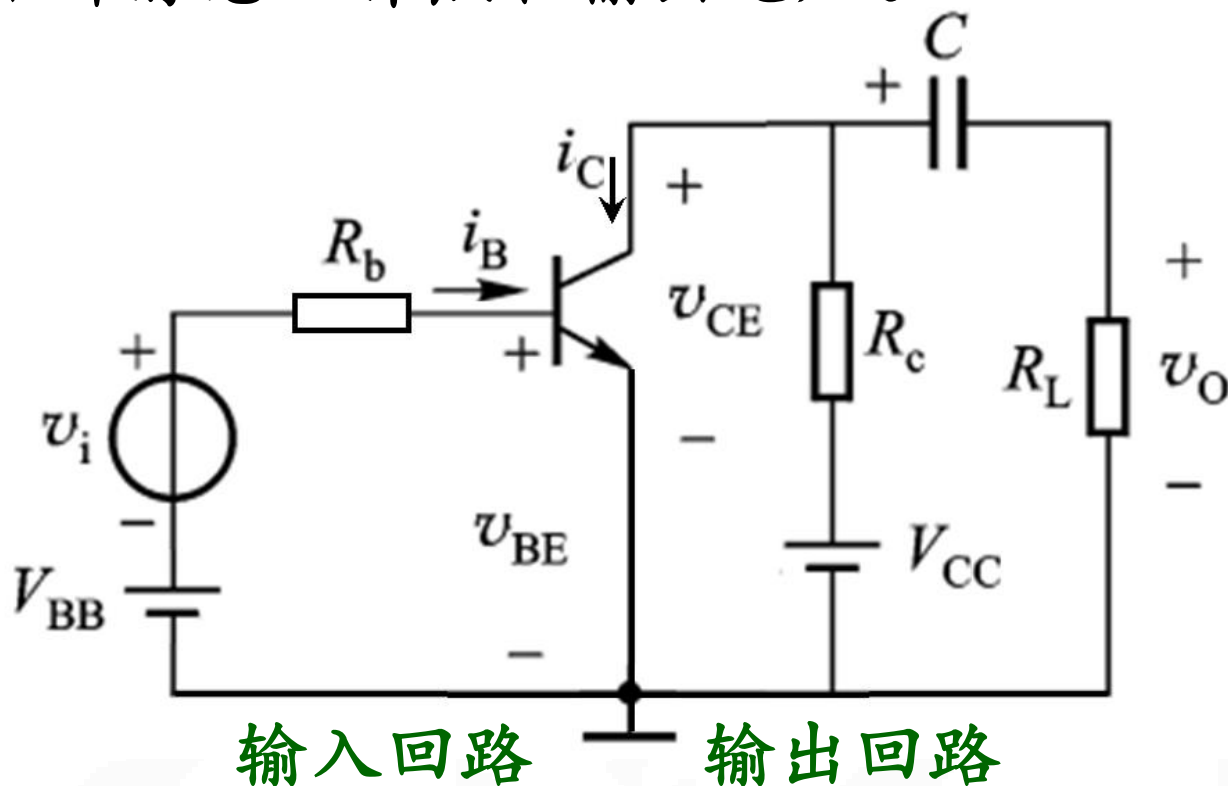
✧ 图解法

- 基本思想是将三极管的 v_{BE} 、 i_B 和 i_C 、 v_{CE} 当作待求变量，利用作图方法求取非线性方程组的解。
- 特点是**直观形象**，易于**说明概念**。

✧ 等效电路法，也称**模型法**、**公式法**、**小信号分析法**

- 基本思想是将非线性元件用线性化模型来代替。
 - 特点是**简单明了**，**计算方便**。
- ✧ 无论是图解法还是模型法，都是“先静态分析，后动态分析”。

下面以一个简单的放大电路为例来说明图解分析法。设 $V_{BB}=1.4\text{V}$, $R_b=17.5\text{ k}\Omega$; $V_{CC}=12\text{V}$, $R_c=R_L=2\text{ k}\Omega$, C 足够大（交流分析时可视为短路）。若 $v_i=0.4\sin\omega t\text{ V}$, 已知三极管的输入特性曲线和输出特性曲线, 估计静态工作点和输出电压。

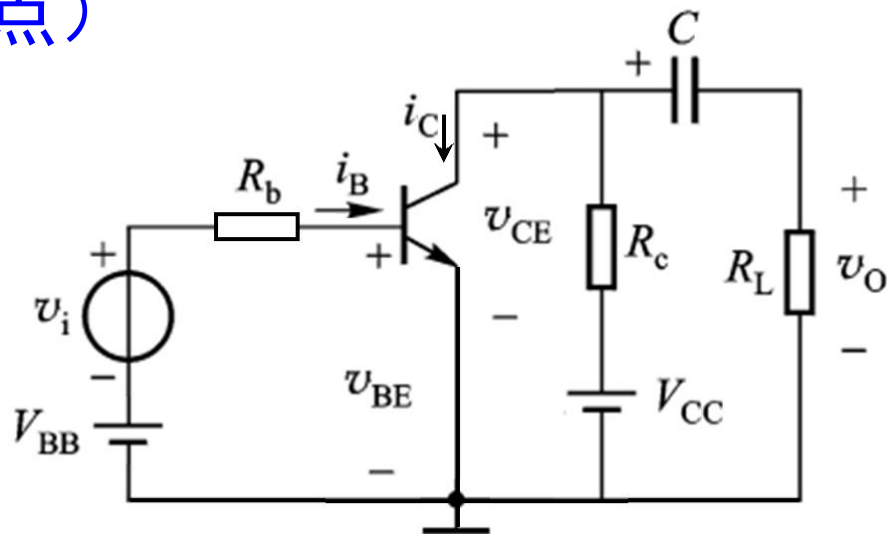




1、直流分析（求静态工作点）

$v_i=0$ 时电路的状态，称为静态工作点，简称 Q 点。

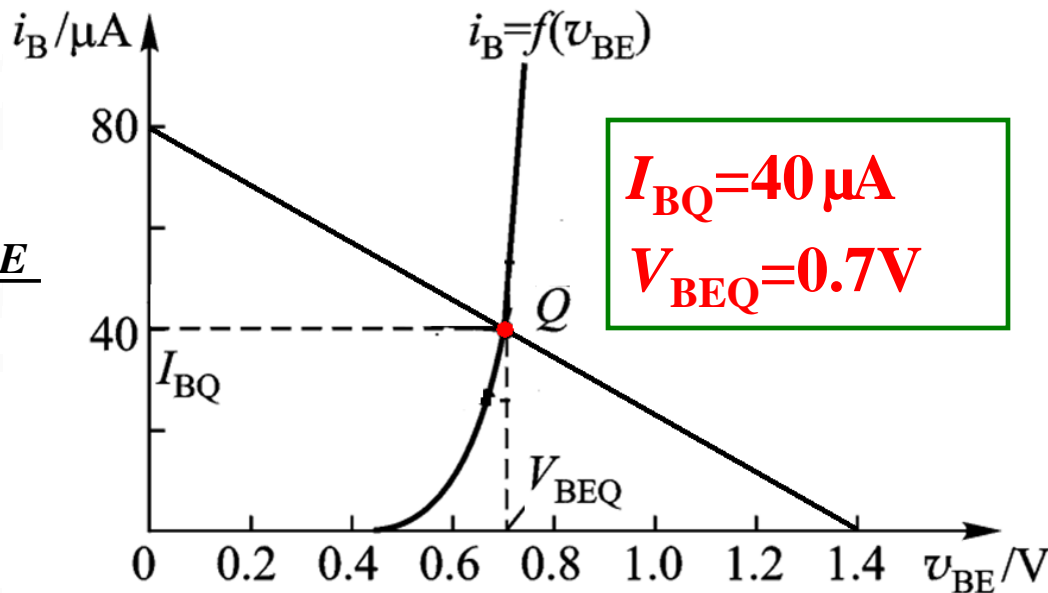
✧ 输入回路（求 I_B 和 V_{BE} ）



输入特性曲线

$$i_B = \frac{V_{BB} - v_{BE}}{R_b} = \frac{1.4 - v_{BE}}{17.5}$$

输入回路方程



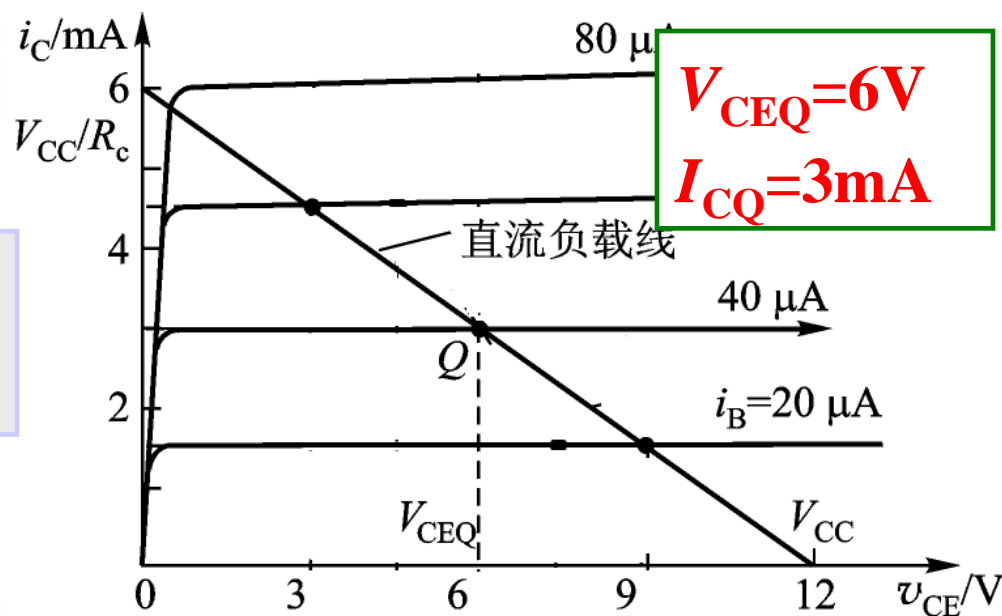
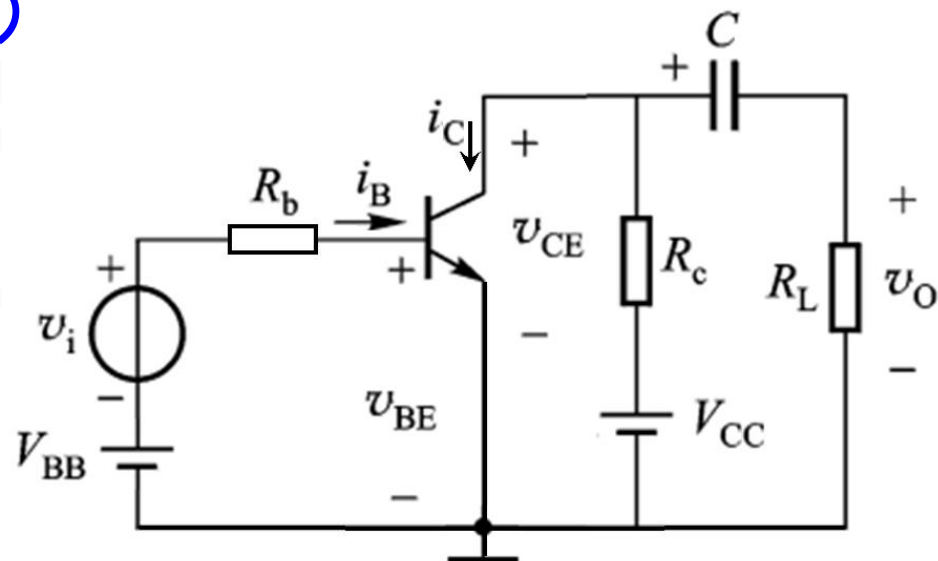
✧ 输出回路（求 I_C 和 V_{CE} ）

$$i_C = f(v_{CE}, i_B) \Big|_{I_B=40\mu A}$$

输出特性曲线

$$i_C = \frac{V_{CC} - v_{CE}}{R_c} = \frac{12 - v_{CE}}{2}$$

输出回路方程

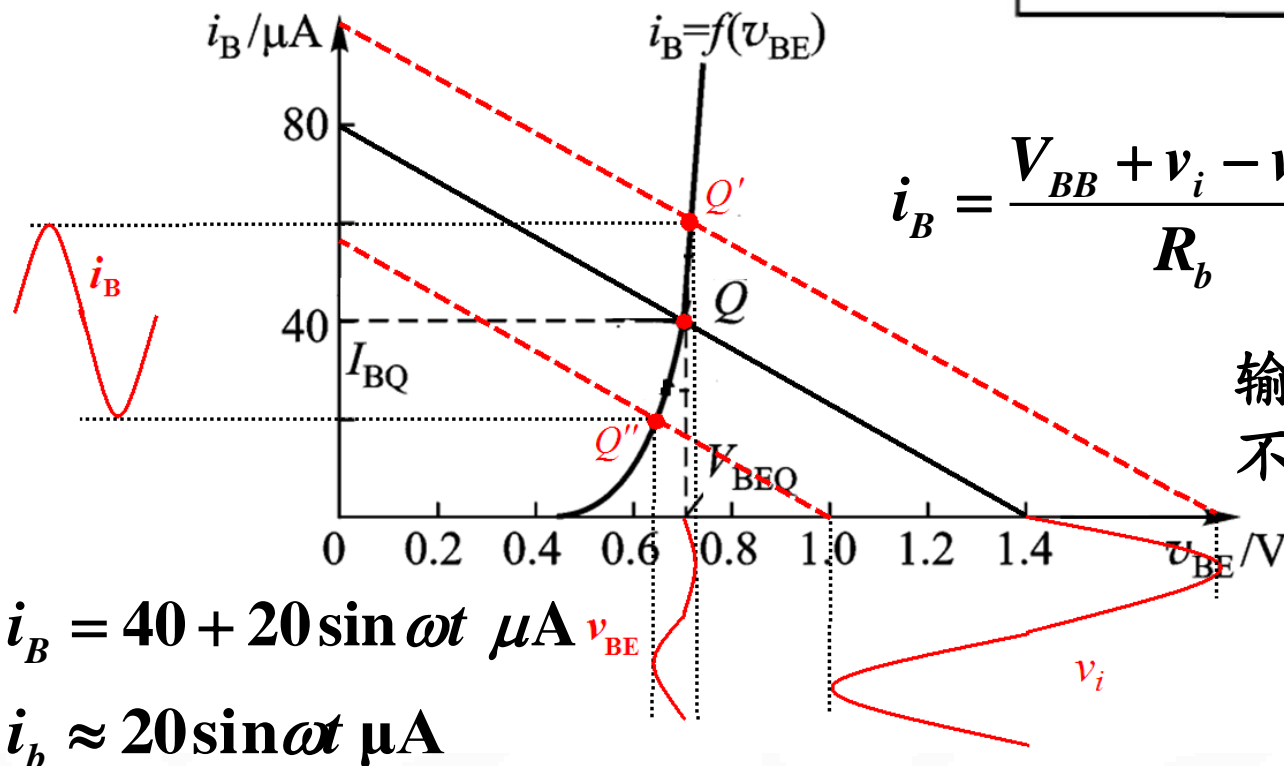
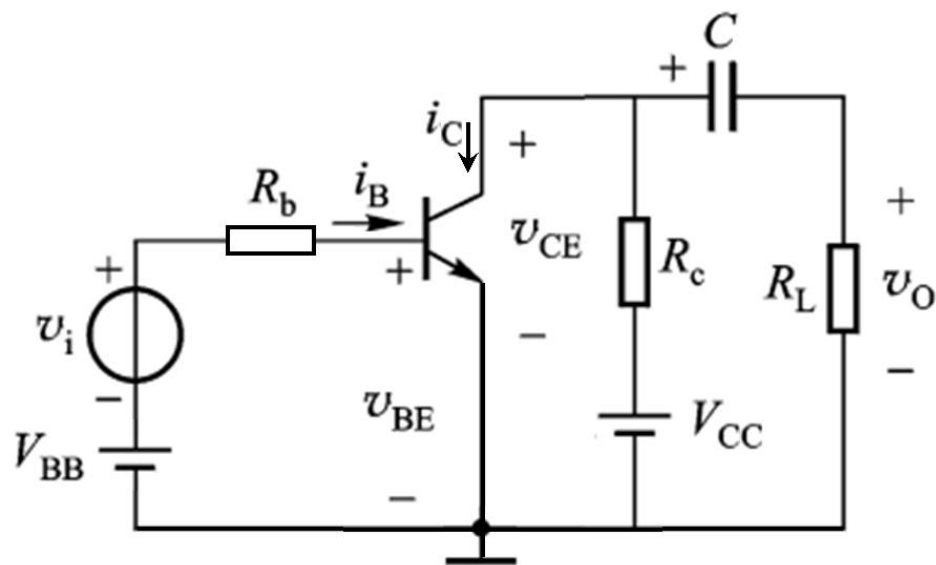


输出回路方程也称为**负载线方程**。

2、交流分析

依据 v_i 输入求出电压
电流波形。

✧ 输入回路



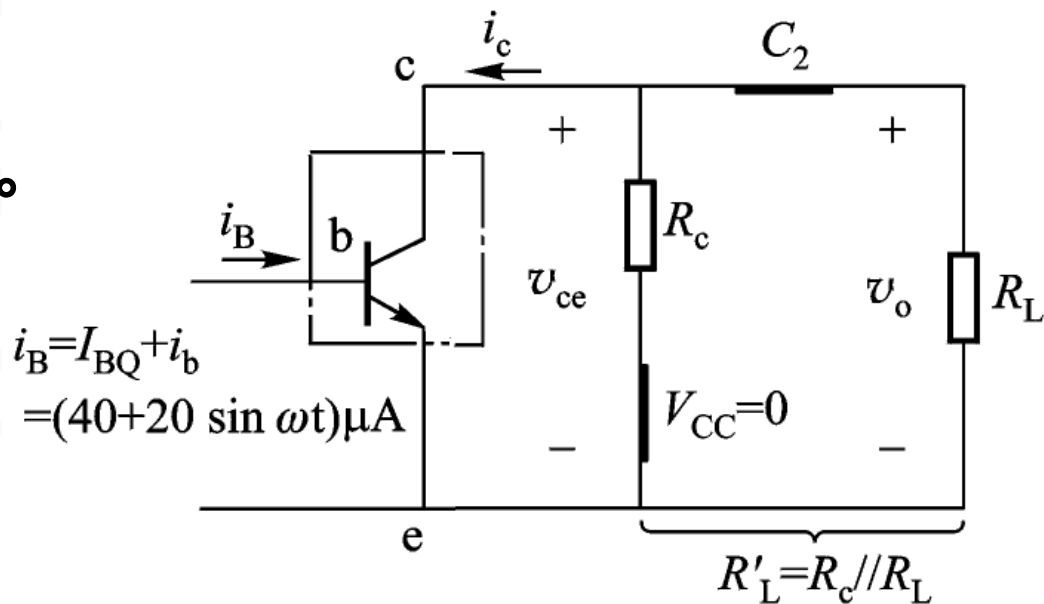
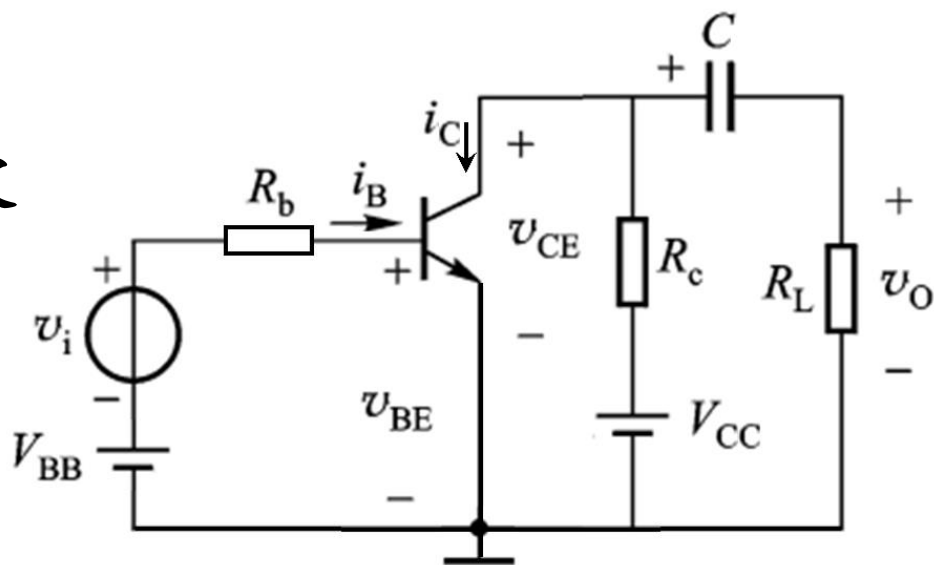
$$i_B = \frac{V_{BB} + v_i - v_{BE}}{R_b} = \frac{1.4 + v_i - v_{BE}}{17.5}$$

输入 v_i 后，斜率保持
不变，平行移动。

☆ 输出回路

依据 i_b 波形求 i_c 和 v_{ce} 波形。先看交流等效通路。

- 交流分析的输出回路方程（负载线）与直流分析不一定相同。
- R'_L 常称为**交流负载**。
- 将 Q 点作为交流分析的坐标原点，**工作点沿交流负载线变化**。



输出回路的交流等效电路

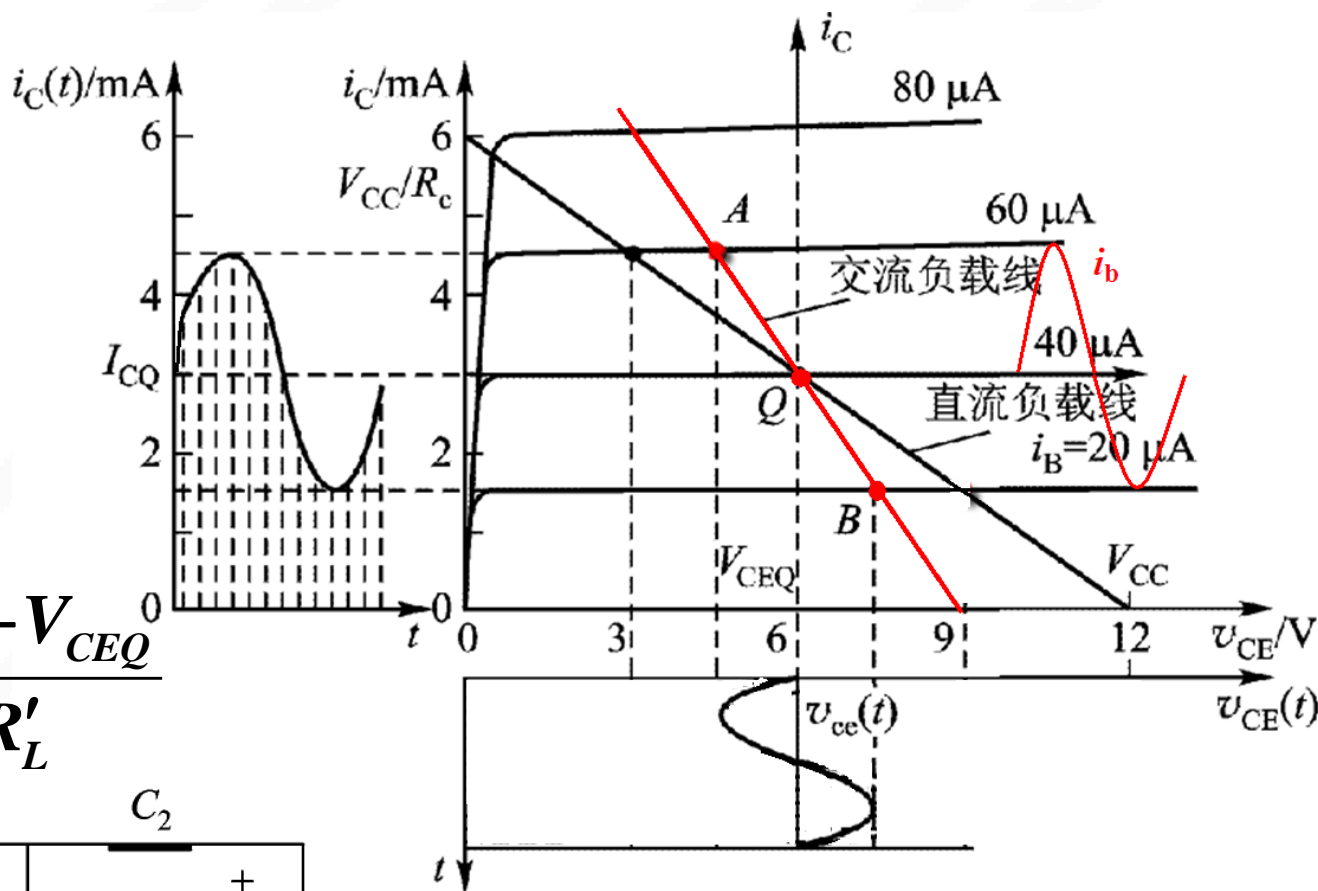
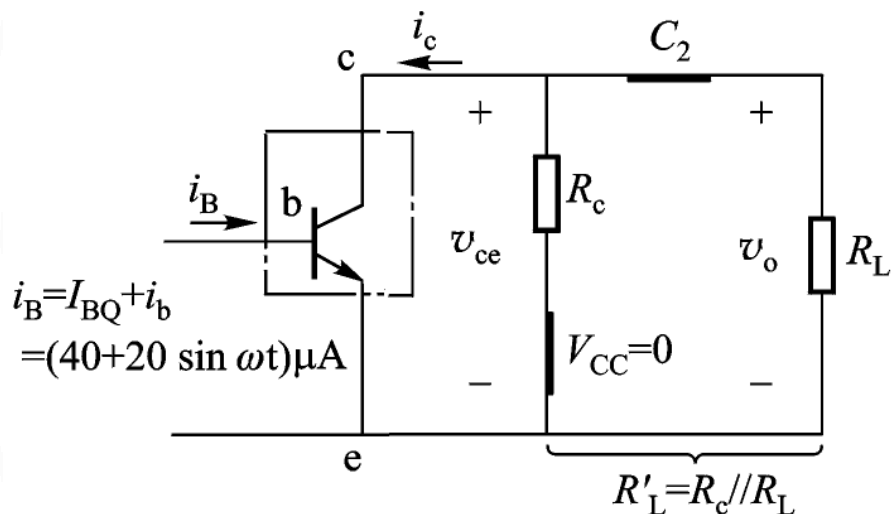
交流负载线

$$i_c = -\frac{v_{ce}}{R'_L}$$

$$\text{即 } \Delta i_c = -\frac{\Delta v_{CE}}{R'_L}$$

也可表示为：

$$i_c - I_{CQ} = -\frac{v_{CE} - V_{CEQ}}{R'_L}$$



$$v_{ce} = -1.5 \sin \omega t \text{ V}$$

$$i_c \approx 1.5 \sin \omega t \text{ mA}$$

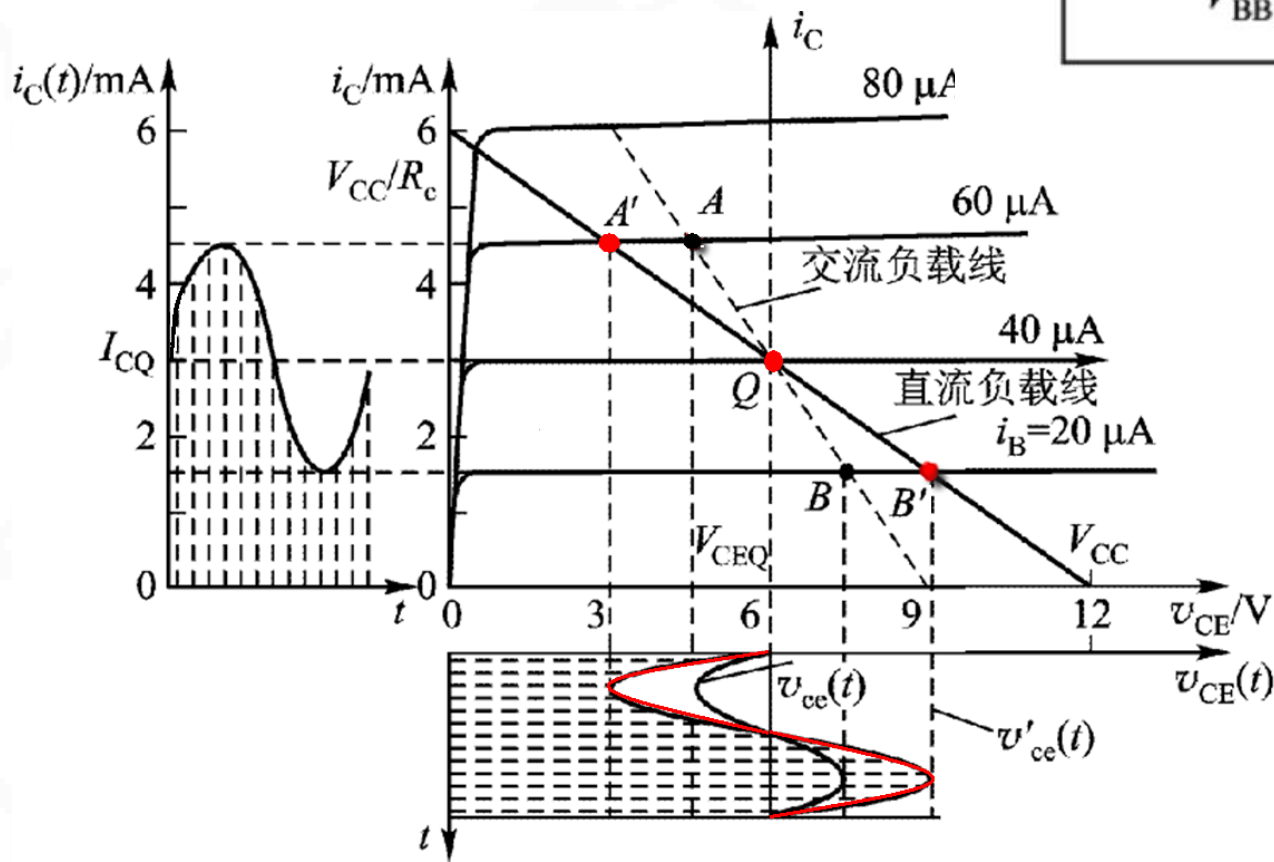
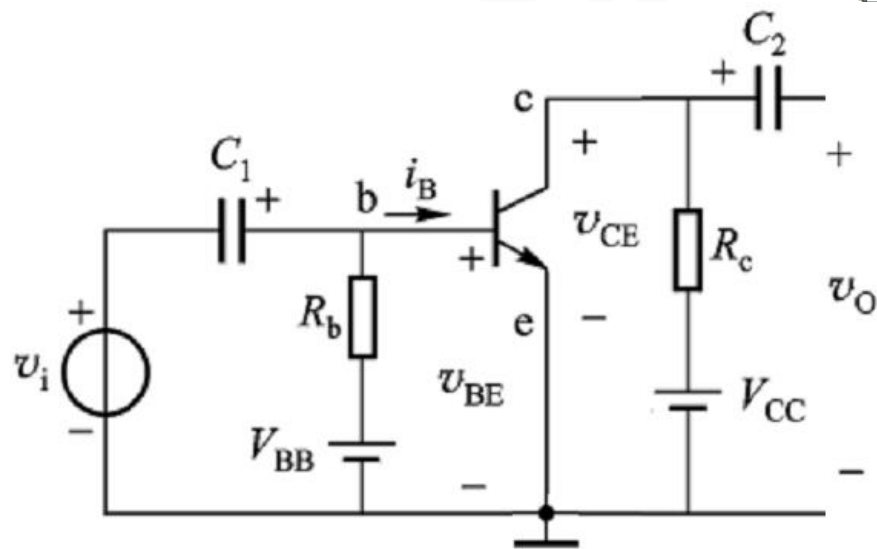
$$v_{CE} = 6 - 1.5 \sin \omega t \text{ V}$$

$$i_c = 3 + 1.5 \sin \omega t \text{ mA}$$



✧ 若不接负载，会如何？

则交流负载线与直流负载线相同。



$$v_{CE} = 6 - 3\sin\omega t \text{ V}$$

$$i_C = 3 + 1.5\sin\omega t \text{ mA}$$

五、放大电路的主要性能指标

放大电路性能的优劣，常用性能指标来衡量。

➤ 增益

又称放大倍数，衡量放大电路放大电信号能力。

最常用的是电压增益：

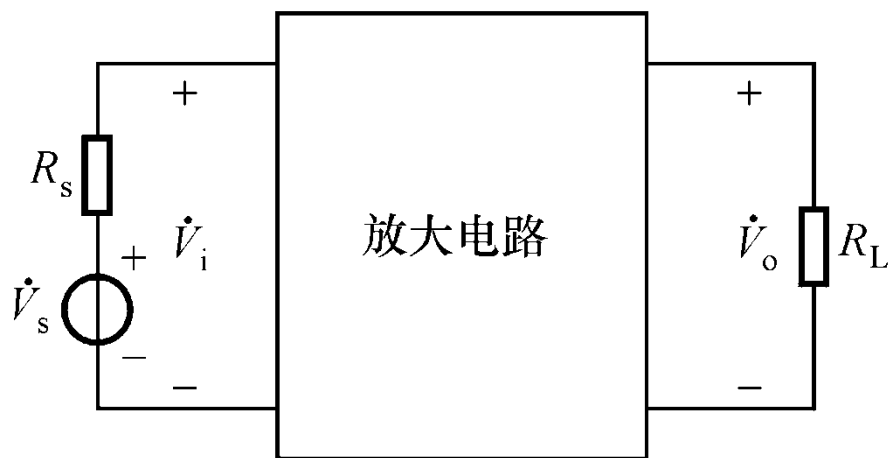
$$\dot{A}_v = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i}$$

✧ 空载电压增益：

$$\dot{A}_{vo} = \frac{\dot{V}_{oo}}{\dot{V}_i}$$

✧ 源电压增益：

$$\dot{A}_{vs} = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_s}$$



◇ 分贝

增益常用分贝(dB)作为单位, 1分贝=1/10贝尔,
源于功率增益的对数:

$$A_p(dB) = 10 \lg(P_o / P_i)$$

当用于电压增益时:

$$A_v(dB) = 20 \lg(V_o / V_i)$$

“**0dB**”相当于 $A_v = \mathbf{1}$;

“**20dB**”相当于 $A_v = \mathbf{10}$;

“**40dB**”相当于 $A_v = \mathbf{100}$;

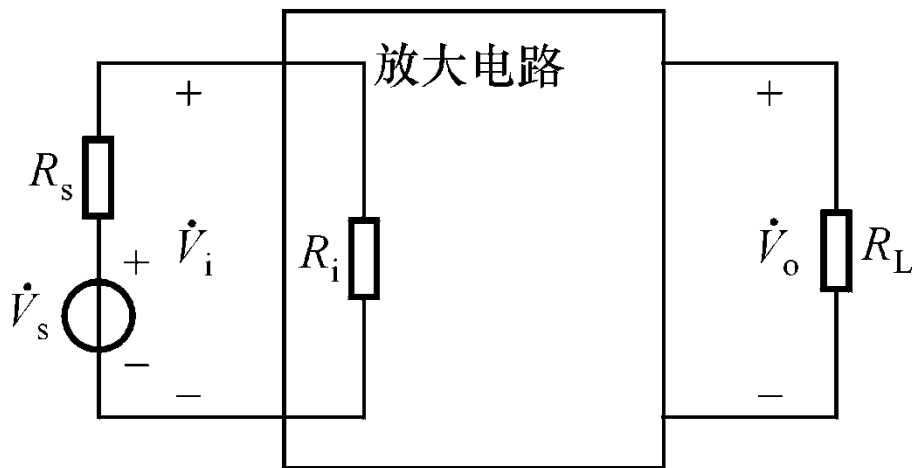
“**-20dB**”相当于 $A_v = \mathbf{0.1}$;

“**-40dB**”相当于 $A_v = \mathbf{0.01}$;

➤ 输入电阻 R_i

输入电阻 R_i 是从放大电路输入端看进去的等效电阻。

$$R_i = \frac{V_i}{I_i}$$



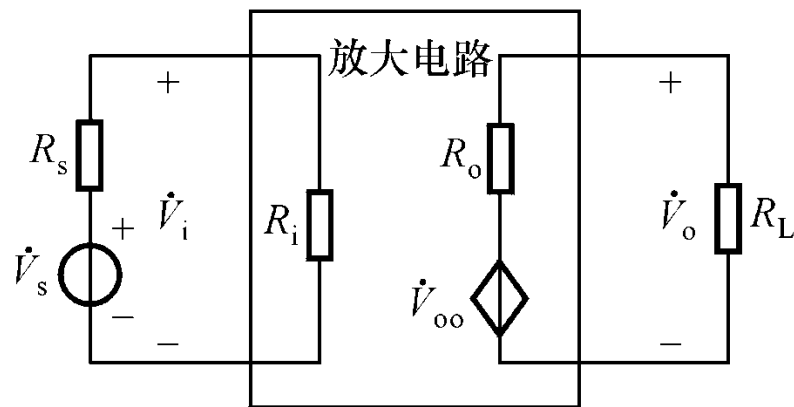
输入电阻反映了放大电路从信号源所汲取电压的能力。 **R_i 越大**，则信号电压损失越小，输入电压越接近信号源电压。

输入电阻影响源电压增益：

$$\dot{A}_{vs} = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_s} = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i} \cdot \frac{\dot{V}_i}{\dot{V}_s} = \frac{R_i}{R_i + R_s} \dot{A}_v$$

➤ 输出电阻 R_o

✧ 放大电路负载开路时从输出端看进去的等效信号源内阻。

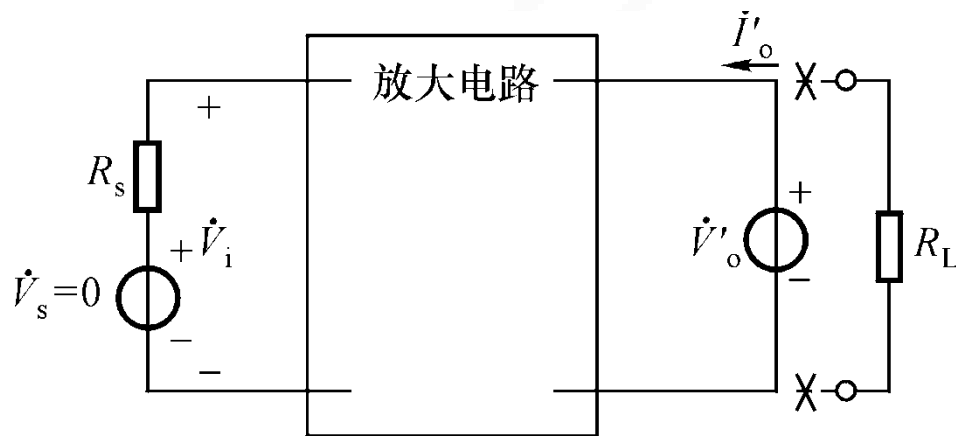


✧ 输出电阻的大小，反映了放大电路带负载的能力。
 R_o 越小，则放大电路带负载能力越强，电路输出越接近恒压源输出。

✧ 输出电阻 R_o 的确定：

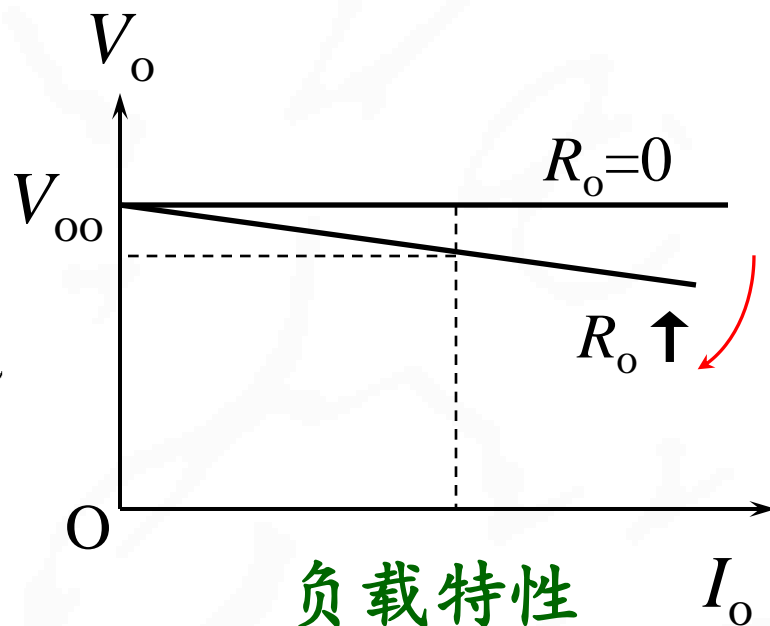
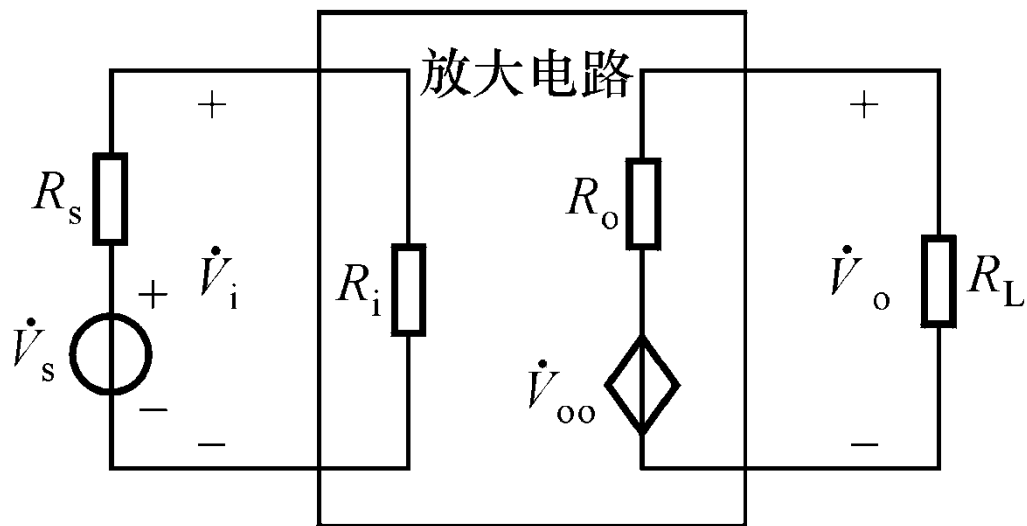
① 电路分析法

$$R_o = \left. \frac{\dot{V}'_o}{\dot{I}'_o} \right|_{V_s=0, R_L=\infty}$$





② 实验测量法



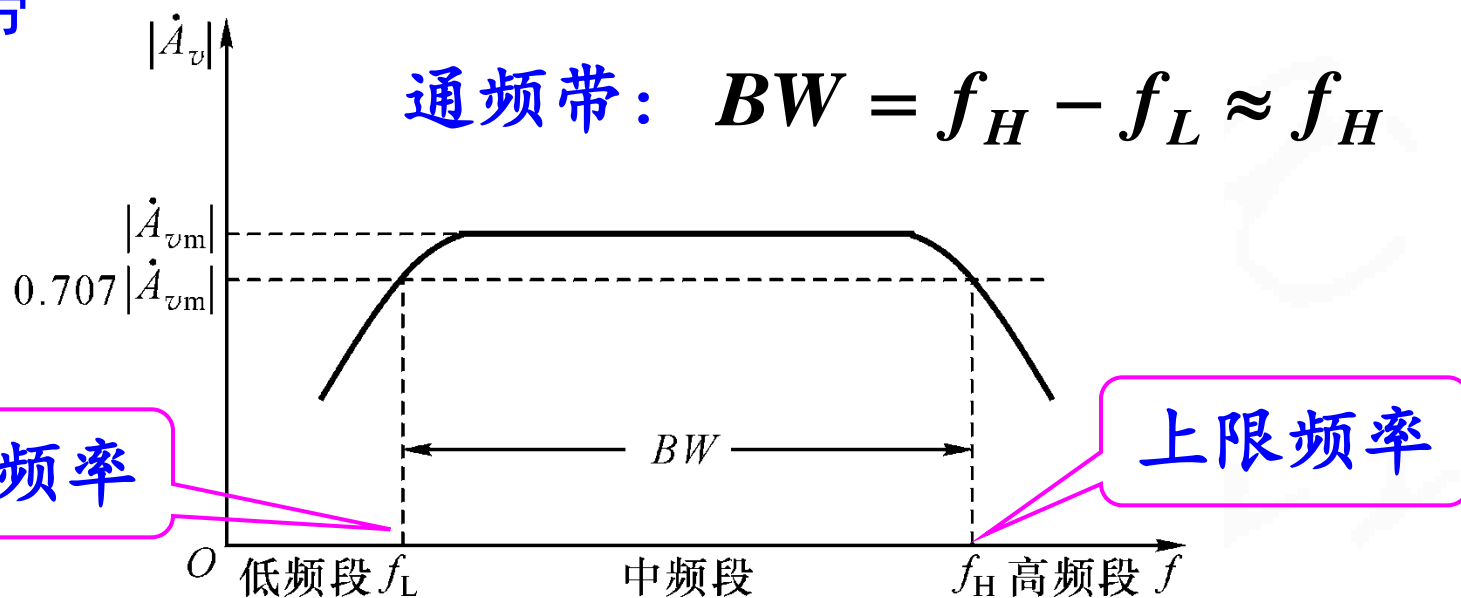
- 测量空载（ R_L 开路）时的输出电压 V_{oo} ；
- 测量带载（接已知阻值的 R_L ）时的输出电压 V_o 。

$$V_o = \frac{R_L}{R_o + R_L} V_{oo}$$

$$R_o = \left(\frac{V_{oo}}{V_o} - 1 \right) R_L$$

负载特性“硬”的含义是什么？

➤ 通频带



低频段或高频段: 耦合电容和结电容的影响。

通频带越宽, 表明放大电路对不同频率信号的适应能力越强。

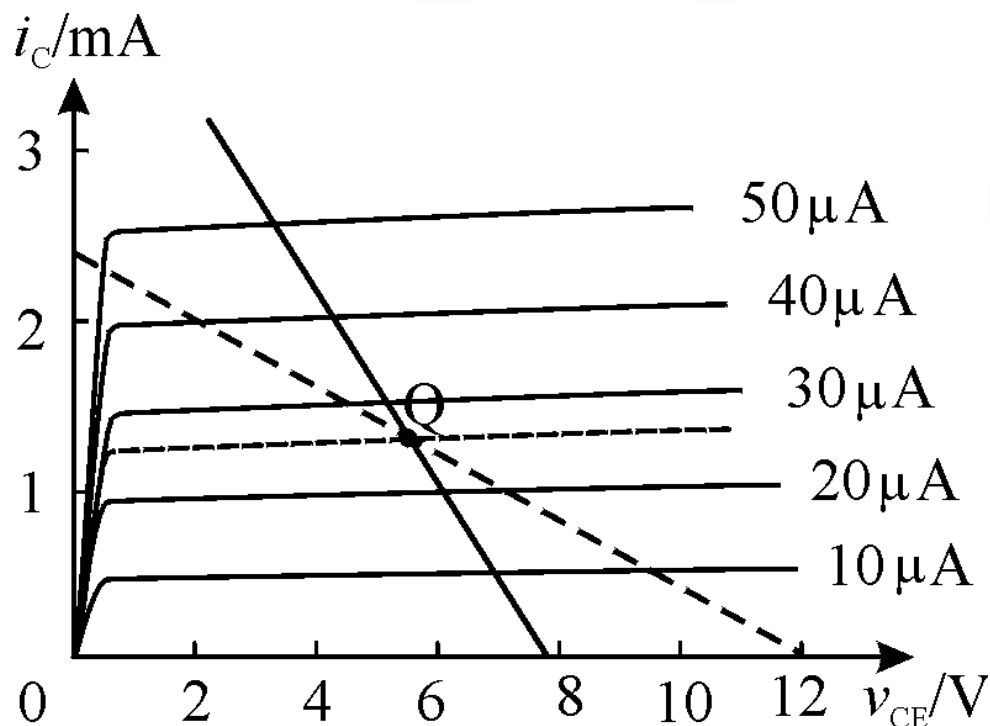
如对于扩音机电路, 其通频带应大于音频范围 (20Hz~20kHz)。

➤ 最大不失真输出幅度

最大不失真输出幅度是放大电路在输出波形不产生非线性失真的条件下，所能提供的最大输出电压(或输出电流)的峰值，用 V_{om} (或 I_{om})表示。

✧ **截止失真**：由于进入截止区而产生的失真。

✧ **饱和失真**：由于进入饱和区而产生的失真。





1.2 单管放大电路的分析

从前一节可知，构成放大电路的基本原则是合适的静态偏置和合适的耦合方式。具体地说，包括：

- ① 直流电源的**极性**要与三极管的类型相配合，电阻的设置要确保器件工作在**放大区**，并且尽量位于放大区的**中间**位置。
- ② 外加**输入信号**能有效地**加到放大器件的输入端**，使三极管输入端的电流或电压跟随输入信号成比例变化。
- ③ 经三极管放大后的**输出信号**应能有效地**转变为负载上的输出电压信号**。



一、放大电路的直流偏置与静态分析

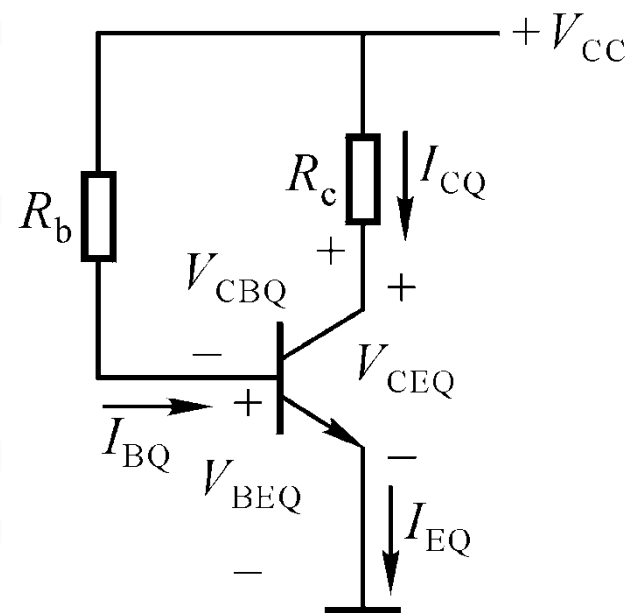
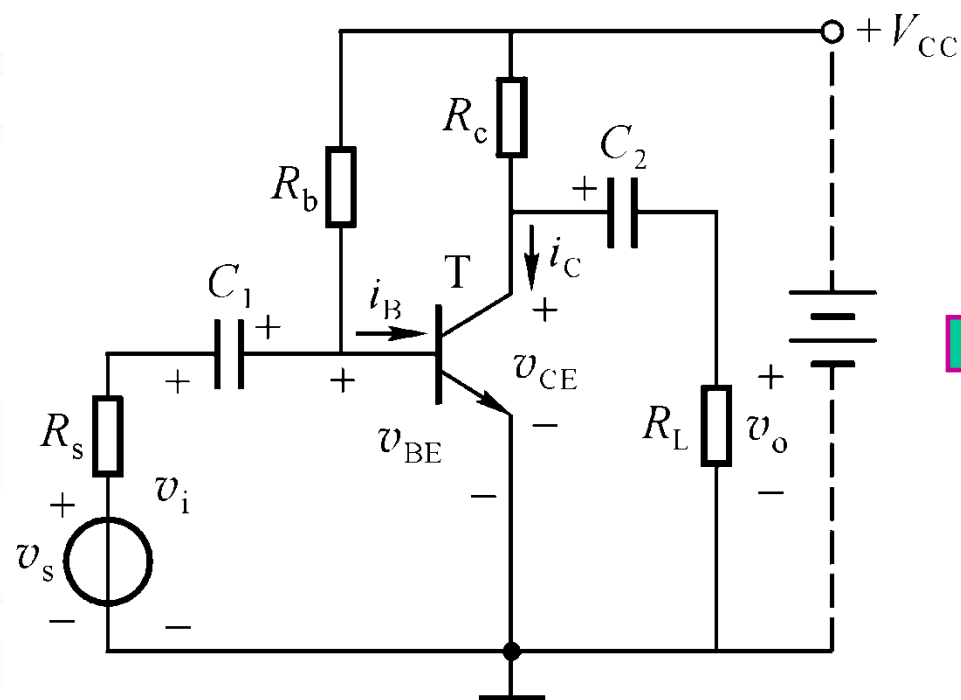
静态分析又称为直流分析，静态分析应采用**直流通路**，通过直流通路计算放大电路的静态偏置。

➤ 直流通路

- ✧ 当不考虑输入信号，即 $v_i=0$ 时，电路所处的状态称为静态。
- ✧ 静态时，三极管中的电流、电压均为**直流量**。
- ✧ 直流通路的画法：将所有电容开路，令交流信号源为0，其它不变。



【示例】



直流通路



1、三极管放大电路的直流偏置

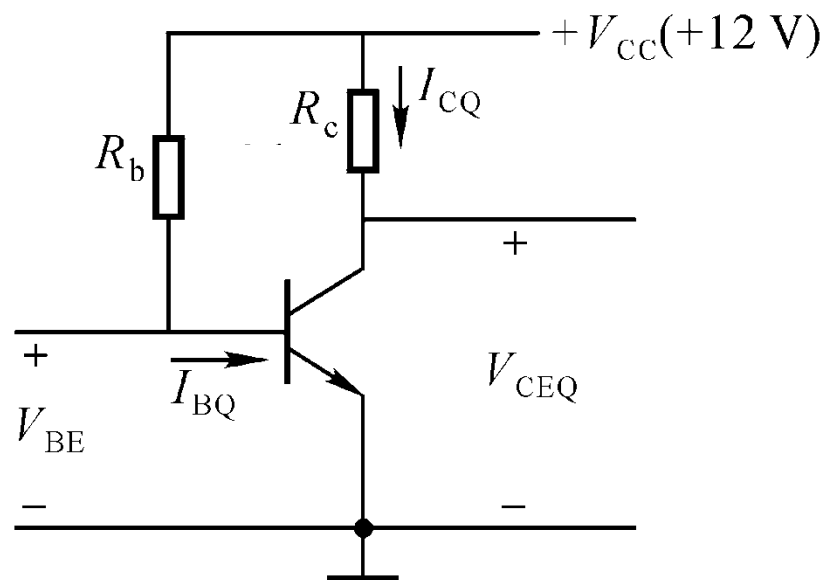
放大电路对静态偏置的要求，除了保证三极管工作在**放大状态**外，还有工作点稳定性的要求，即当外界环境（如温度）变化时，静态工作点能**保持基本不变**。

◇ 三极管放大电路常见的3种偏置电路：

- 基极固定偏置电路（单电源偏置）
- 基极分压式偏置电路（万能偏置）
- 双电源式射极偏置电路

➤ 基极固定偏置电路

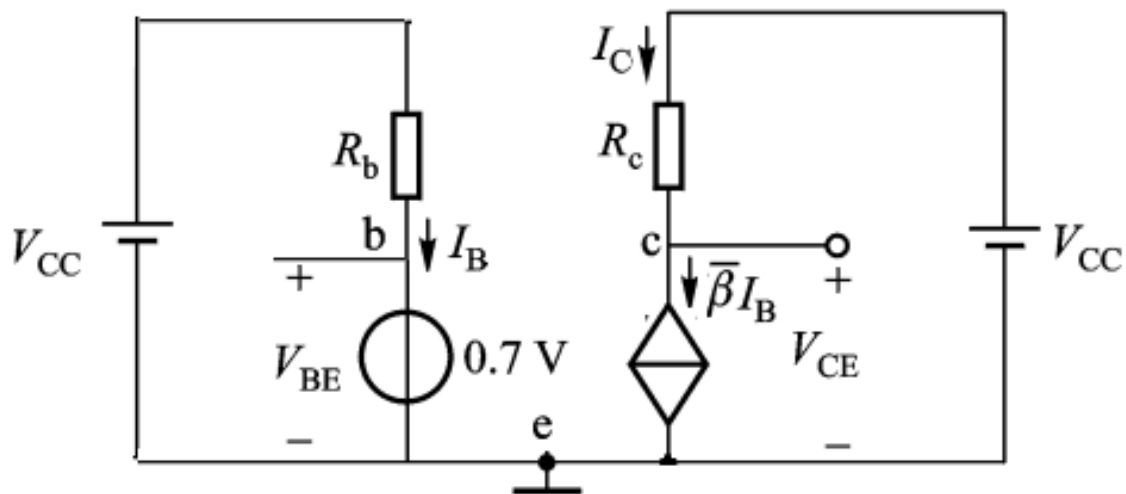
- ✧ 单电源偏置
- ✧ 通过 R_b 提供基极电流 I_{BQ}
- ✧ 通过 R_c 调节 V_{CEQ}
- ✧ 选择 R_b 和 R_c ，可以使三极管工作在放大状态。



$$I_{BQ} = (V_{CC} - V_{BEQ}) / R_b$$

$$I_{CQ} = \beta I_{BQ}$$

$$V_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ} R_c$$

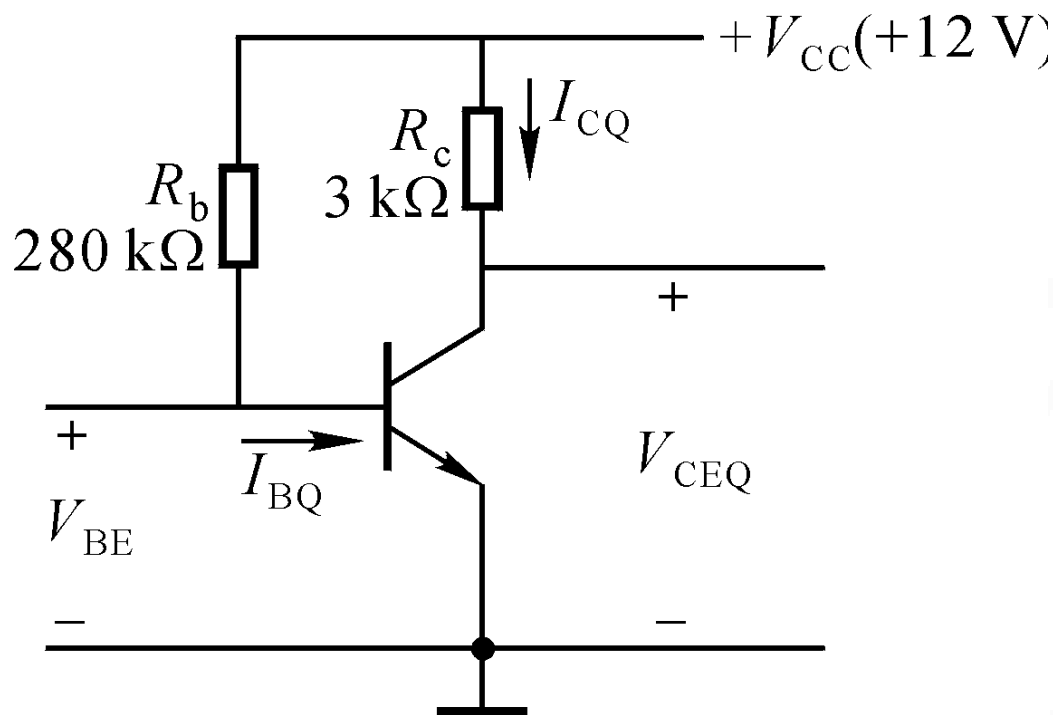


等效电路

【例1】

已知 $V_{CC}=12\text{V}$, $V_{BE}=0.7\text{V}$, $\beta=50$ 。

- (1) 若 $R_b=280\text{k}\Omega$, $R_c=3\text{k}\Omega$, 求静态工作点 Q ;
- (2) 若 R_b 改为 $110\text{k}\Omega$, 其余参数不变, 重新计算 Q 值。

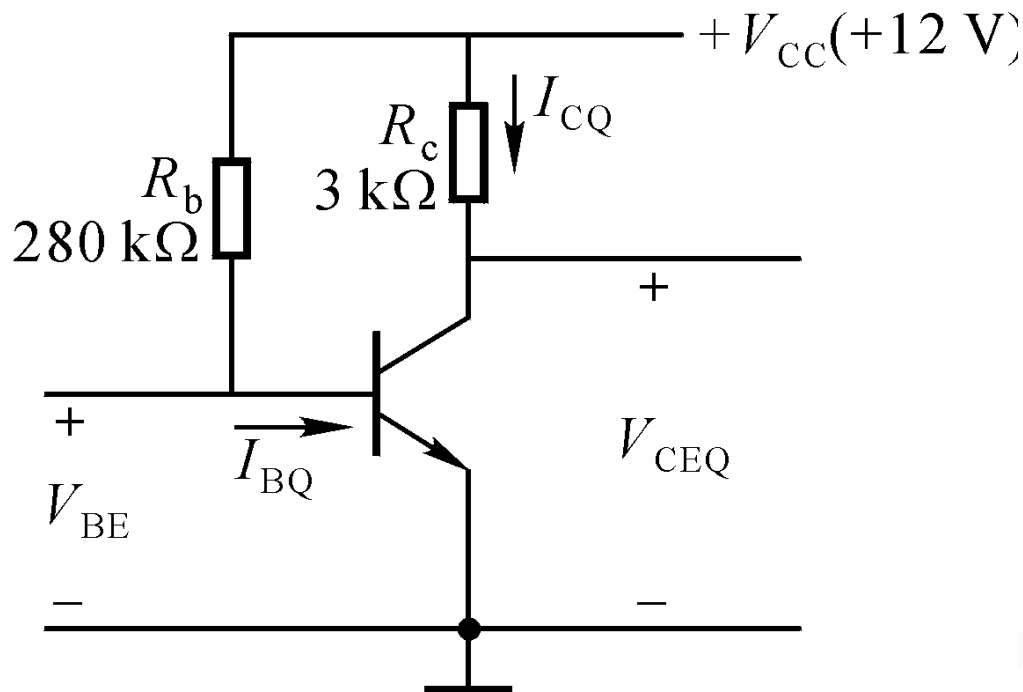


【解】 (1) $R_b=280\text{k}\Omega$ 时

$$I_{BQ} = \frac{V_{CC} - V_{BEQ}}{R_b} \\ \approx 40\mu\text{A}$$

$$I_{CQ} = \beta I_{BQ} = 2\text{mA}$$

$$V_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ}R_c \\ = 6\text{V} > 0.7\text{V}$$



假设成立。结果说明三极管不仅工作在放大区，而且还处于放大区的中心。

(2) 若 R_b 改为 $110\text{k}\Omega$ 。

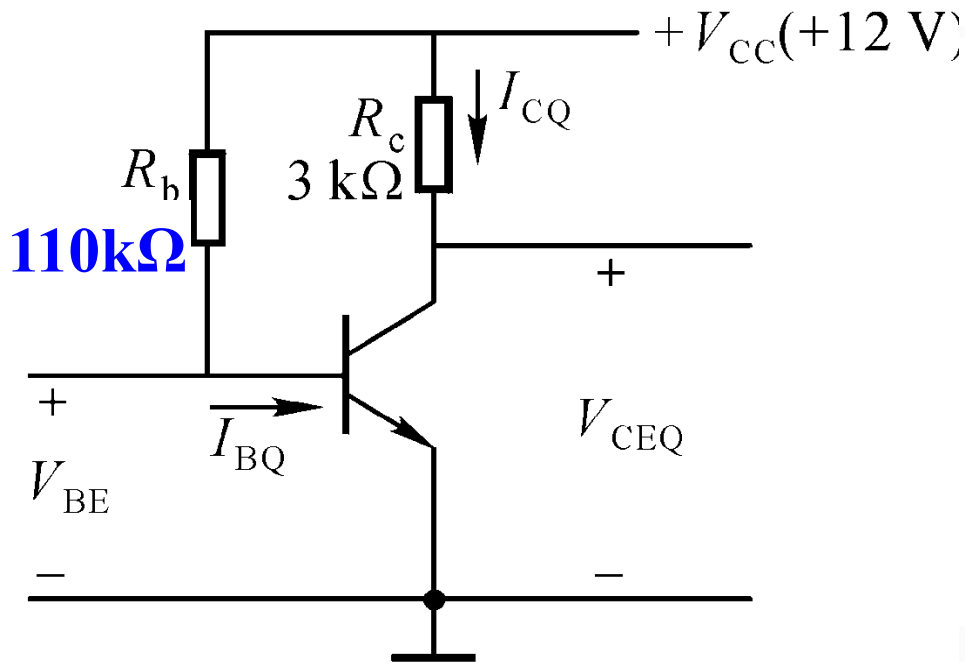
$$I_{BQ} = \frac{V_{CC} - V_{BEQ}}{R_b} \approx 103\mu\text{A}$$

$$I_{CQ} = \beta I_{BQ} = 5.15\text{mA}$$

$$\begin{aligned} V_{CEQ} &= V_{CC} - I_{CQ} R_c \\ &= -3.45\text{V} < 0.7\text{V} \end{aligned}$$

$$V_{CEQ} = V_{CES} = 0.3\text{V}$$

$$I_{CQ} = I_{CS} = (V_{CC} - V_{CES}) / R_c = 3.9\text{mA}$$

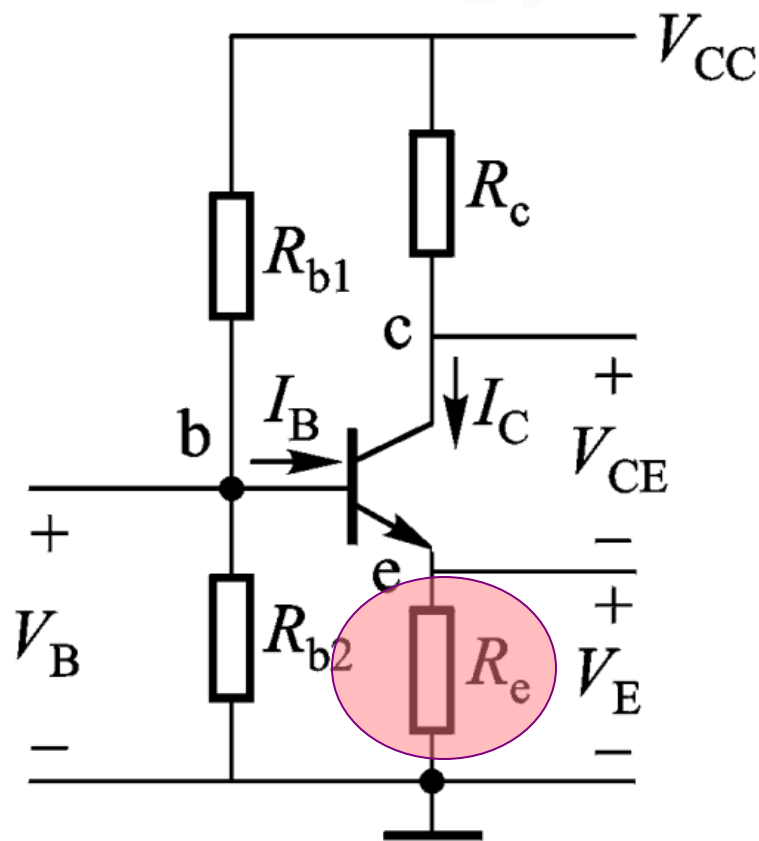


说明：①电阻取值不当，可能使三极管进入饱和区或截止区；②电阻的改变会引起题中静态工作点的变化，即单电源固定偏置电路不具有保持Q点稳定的能力。

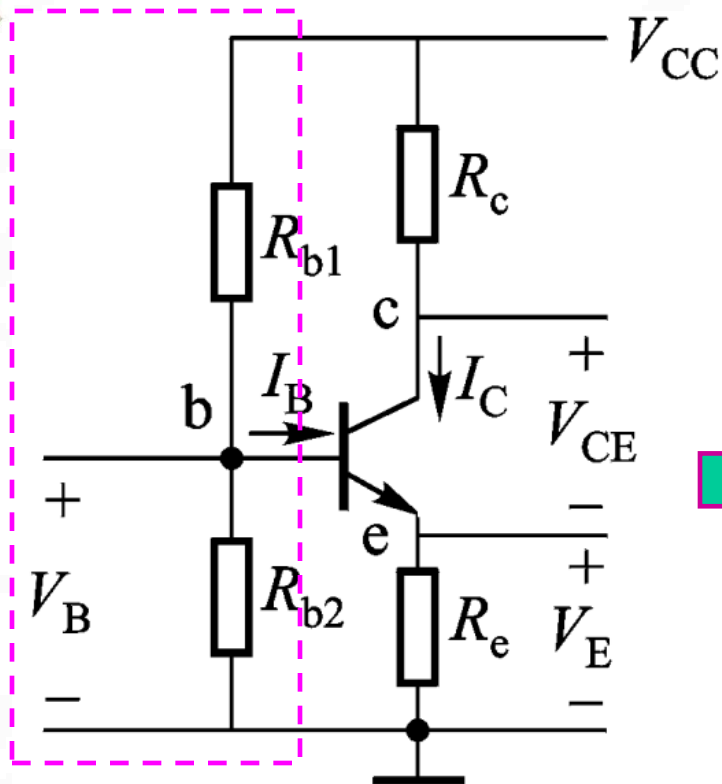
➤ 基极分压式偏置（工作点稳定的偏置电路）

放大电路 Q 点确定以后，希望 Q 点稳定不变。

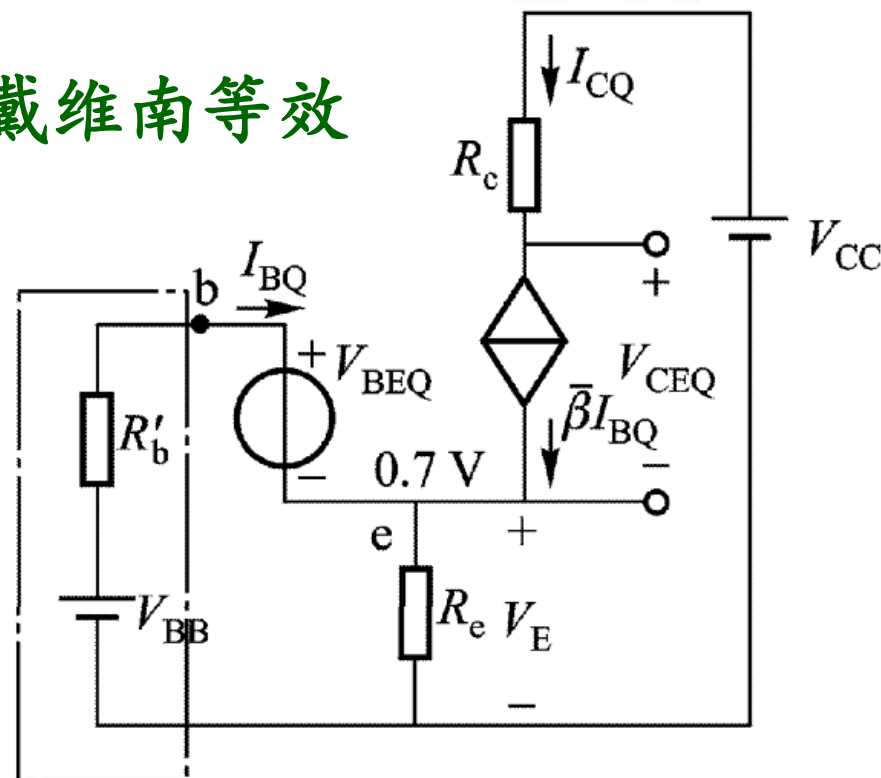
- ✧ 在发射极增加电阻 R_e 。
- ✧ R_e 既处于输入回路，又处于输出回路。
- ✧ 通过 R_{b1} 、 R_{b2} 分压提供基极电流 I_{BQ} 。
- ✧ 输入回路可通过戴维南定理等效为一个含内阻 R'_b 的电压源 V_{BB} 。



基极分压式偏置



戴维南等效



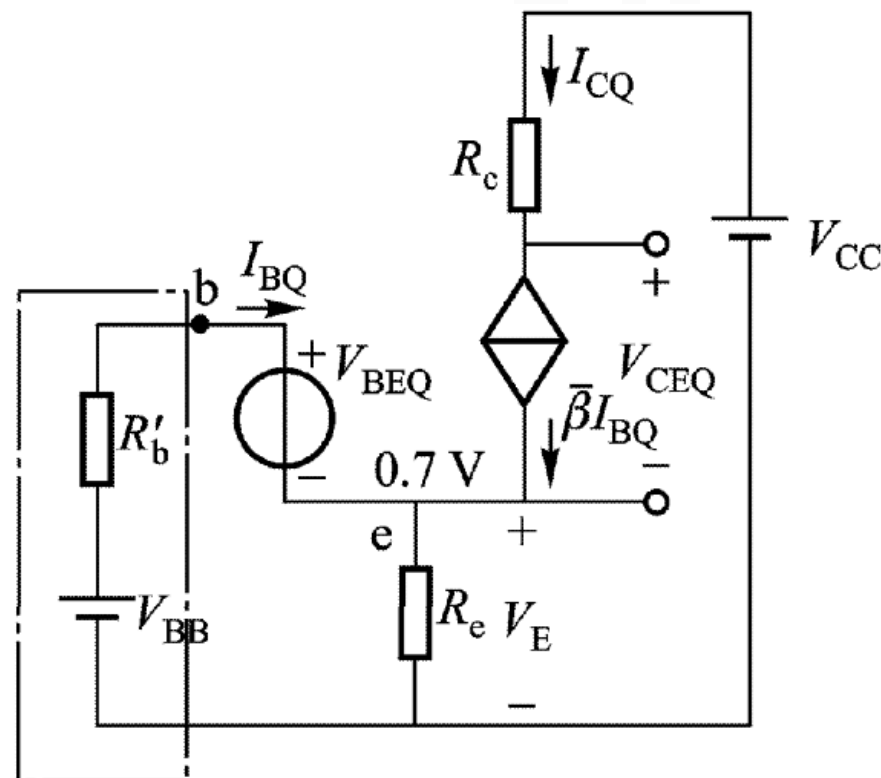
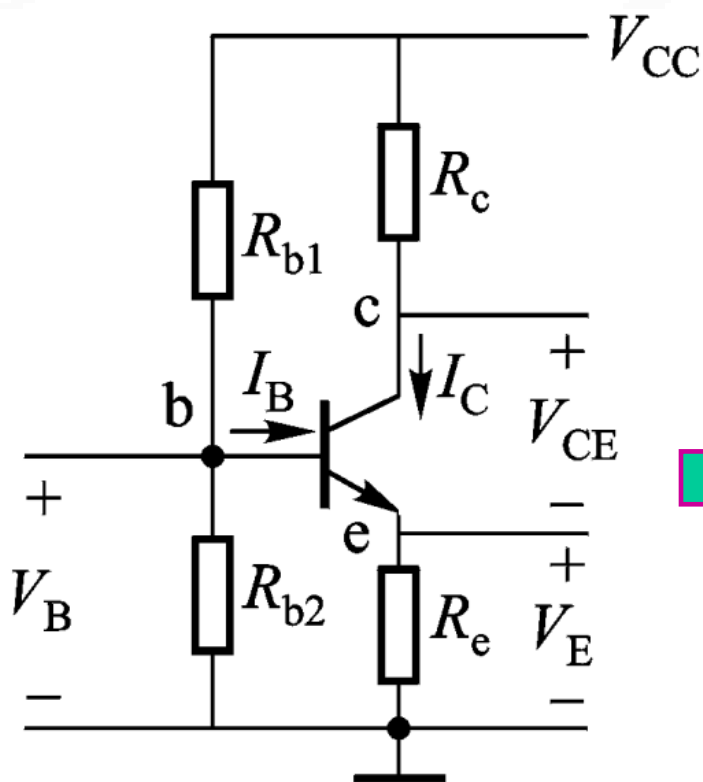
$$V_{BB} = V_{CC} \frac{R_{b2}}{R_{b1} + R_{b2}}$$

$$R'_b = R_{b1} // R_{b2}$$

$$V_{BEQ} = 0.7V$$

$$\begin{aligned} V_{BB} - V_{BEQ} &= I_{BQ} R'_b + (I_{BQ} + I_{CQ}) R_e \\ &= I_{BQ} R'_b + (1 + \bar{\beta}) I_{BQ} R_e \end{aligned}$$

$$I_{BQ} = \frac{V_{BB} - V_{BEQ}}{R'_b + (1 + \bar{\beta}) R_e}$$



$$I_{CQ} = \bar{\beta} I_{BQ} = \frac{\bar{\beta} (V_{BB} - V_{BEQ})}{R'_b + (1 + \bar{\beta}) R_e}$$

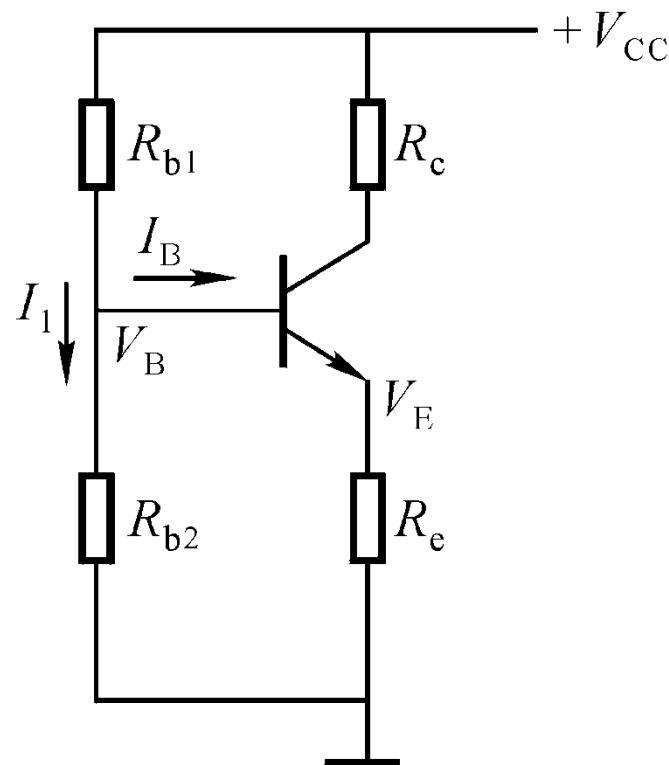
当 $\bar{\beta} \gg 1, (1 + \bar{\beta}) R_e \gg R'_b$

$$I_{CQ} \approx \frac{V_{BB} - V_{BEQ}}{R_e}$$

分压式偏置电路能自动稳定静态工作点。Q点与其它参数(如 β)无关,也不受温度的影响。

◇ 稳定工作点的原理

在静态情况下，若因温度上升等外部原因引起 I_C 增加时，由于基极电位 V_B 固定，则 I_C 增加会使 R_e 上的压降增加，通过负反馈，迫使 I_C 自动下降，从而使 Q 点保持基本不变。



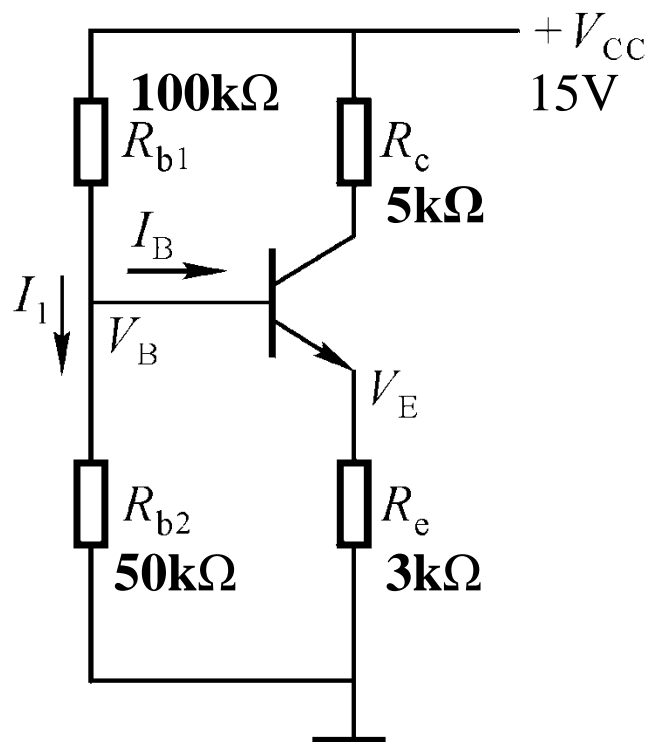
$$\text{温度 } T \uparrow \rightarrow I_C \uparrow \rightarrow I_E \uparrow \rightarrow V_E \uparrow (=I_E R_e)$$

$$\downarrow (V_B \text{ 固定})$$

$$I_C \downarrow \leftarrow I_B \downarrow \leftarrow V_{BE} \downarrow (=V_B - V_E)$$

【例2】

已知 $\beta=100$, $V_{BE}=0.7V$, $V_{CC}=15V$, $R_{b1}=100\text{ k}\Omega$, $R_{b2}=50\text{ k}\Omega$, $R_c=5\text{ k}\Omega$, $R_e=3\text{ k}\Omega$ 。求 Q 点 (I_{BQ} 、 I_{CQ} 、 V_{CEQ})。



【解1】 精确计算。

输入回路利用戴维南等效：

$$V_{BB} = 15 \times \frac{50}{100 + 50} = 5V$$

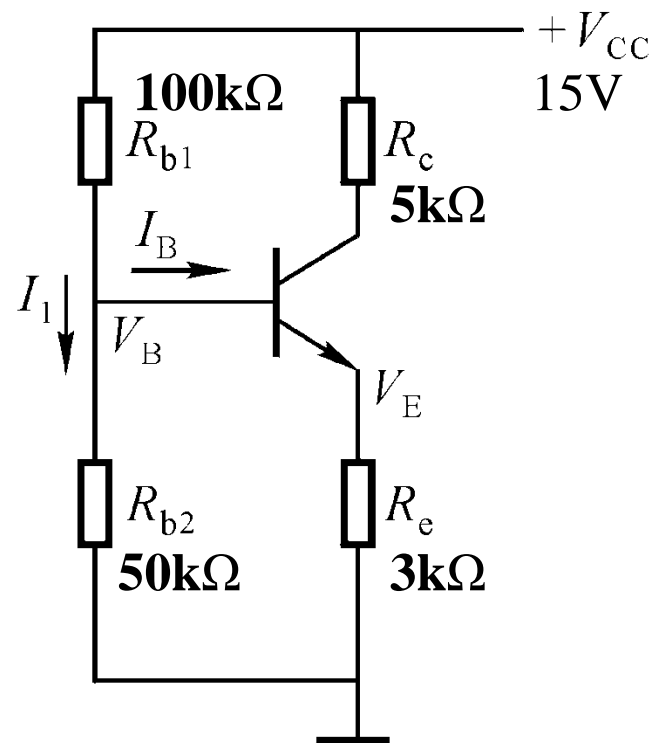
$$R_b = 100 // 50 = 33.3 \text{ k}\Omega$$

由输入回路列方程，可得：

$$I_{BQ} = \frac{V_{BB} - 0.7 \text{ V}}{R_b + (1 + \beta)R_e} = \frac{5 - 0.7}{33.3 + 101 \times 3} = 0.0128 \text{ mA} = 12.8 \mu\text{A}$$

$$I_{CQ} = \beta I_{BQ} = 1.28 \text{ mA}$$

$$V_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ}(R_c + R_e) = 15 - 1.28 \times (5 + 3) = 4.76 \text{ V}$$





【解2】 近似计算。

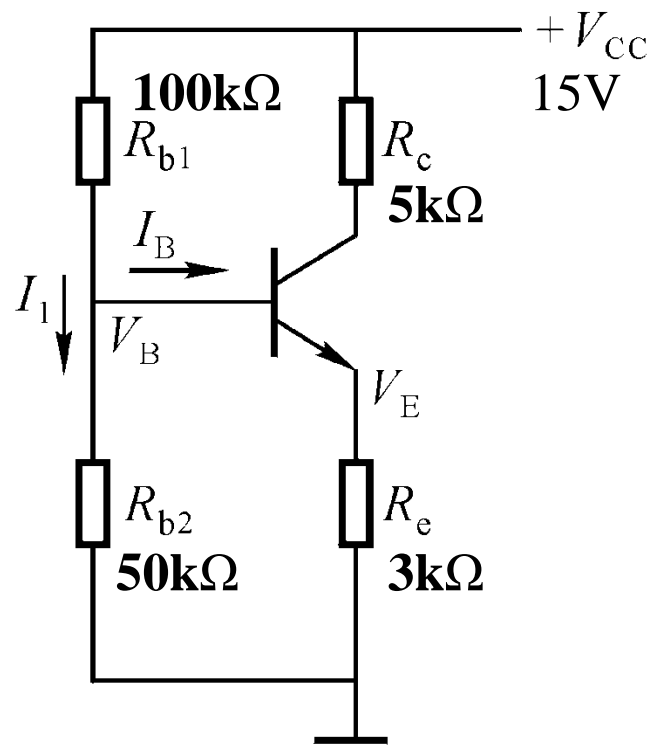
基极电压近似为：

$$V_B \approx 15 \times \frac{50}{100 + 50} = 5\text{V}$$

$$I_{CQ} \approx I_{EQ} = \frac{V_B - 0.7\text{V}}{R_e} = 1.43\text{mA}$$

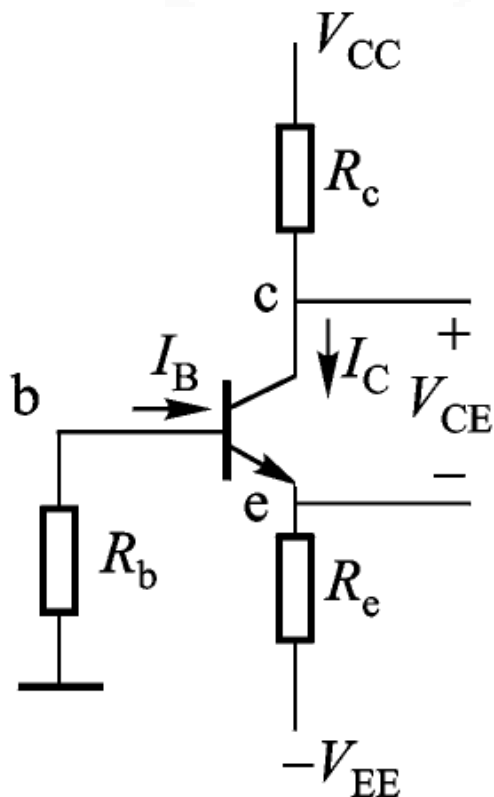
$$I_{BQ} = I_{CQ} / \beta = 14.3\mu\text{A}$$

$$V_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ}(R_c + R_e) = 15 - 1.43 \times (5 + 3) = 3.56\text{V}$$

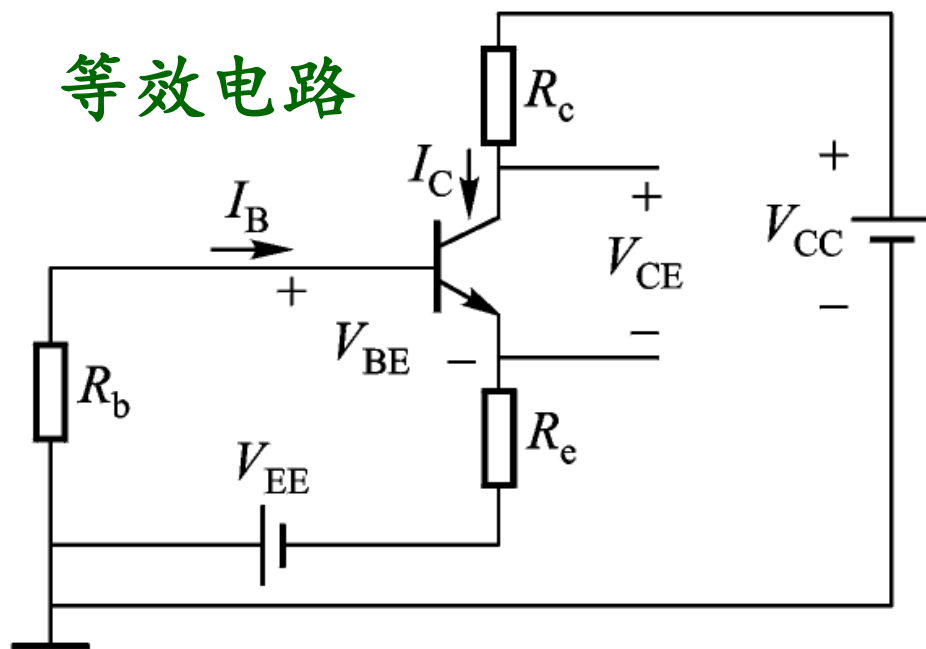


两个方法所得结果略有不同，方法2近似计算的实质是什么？什么条件下才可以采用方法2近似计算？

➤ 双电源式射极偏置电路



等效电路



- ✧ 正、负两组电源供电
- ✧ 在集成电路中较常见

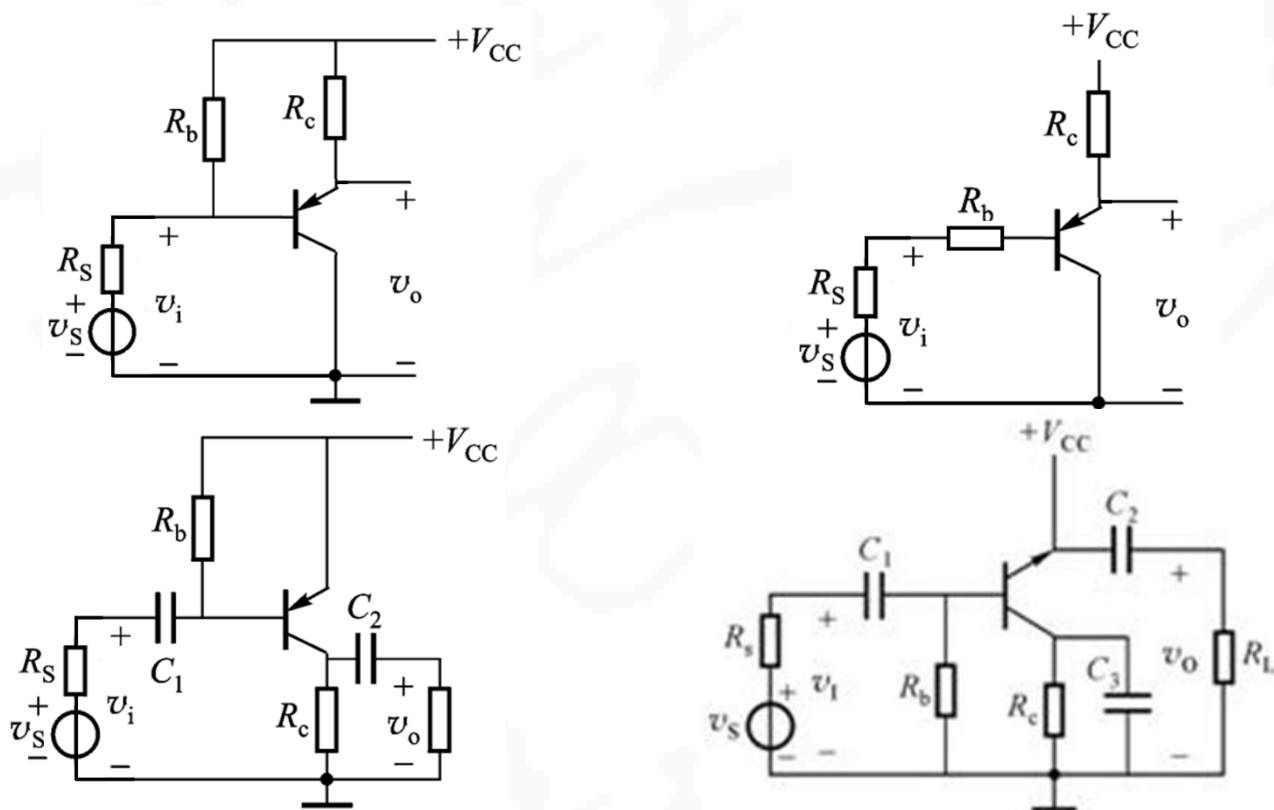
$$V_{EE} - V_{BEQ} = I_{BQ}R_b + I_{EQ}R_e$$

$$I_{BQ} = \frac{V_{EE} - V_{BEQ}}{R_b + (1 + \beta)R_e}$$

$$V_{CEQ} = V_{CC} + V_{EE} - I_{CQ}(R_c + R_e)$$

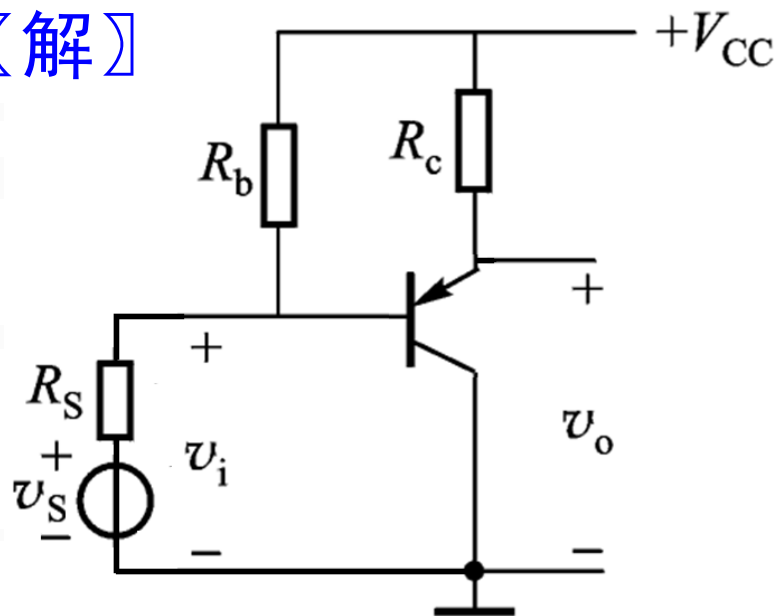
【例3】

图示放大电路，试根据放大电路的直流通路分析各个放大电路的静态偏置是否符合要求。如发现问题，请指出原因，并画出正确的电路。对于图中给出的信号源可以认为是理想电压源，即认为 $R_s=0$ 。

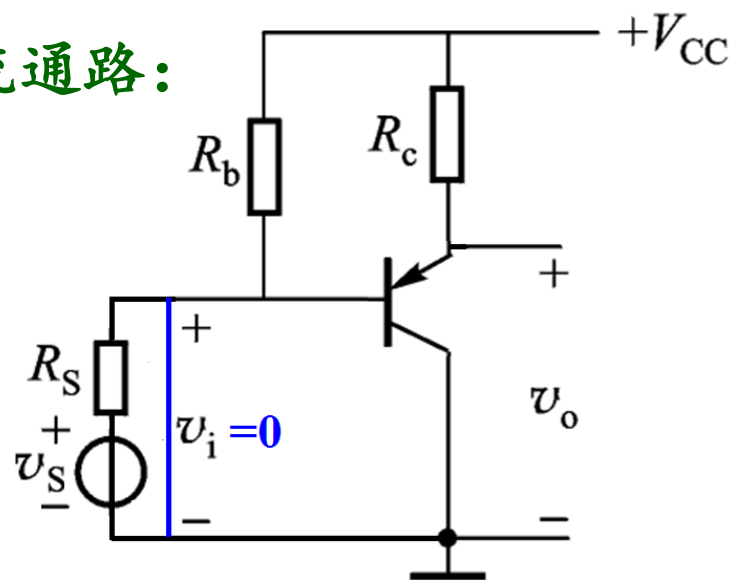




【解】

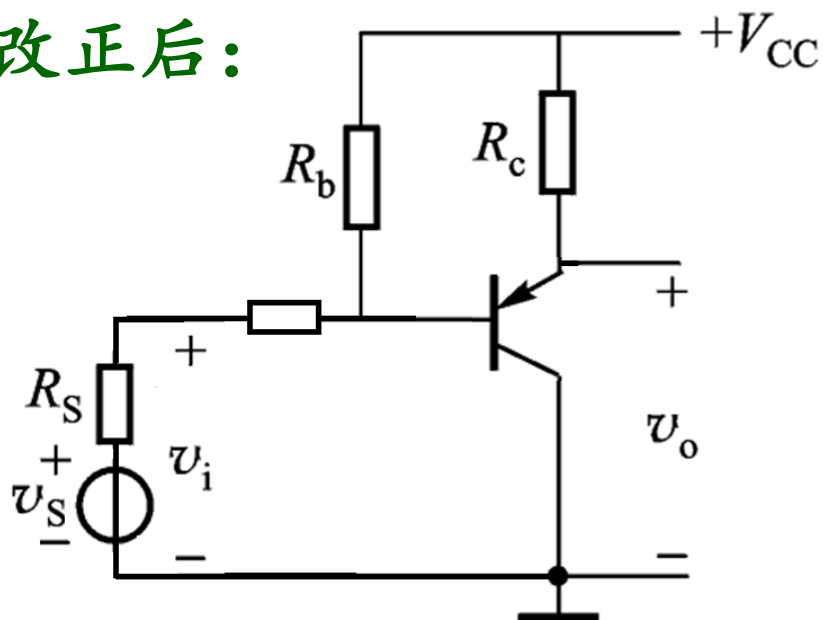


直流通路:

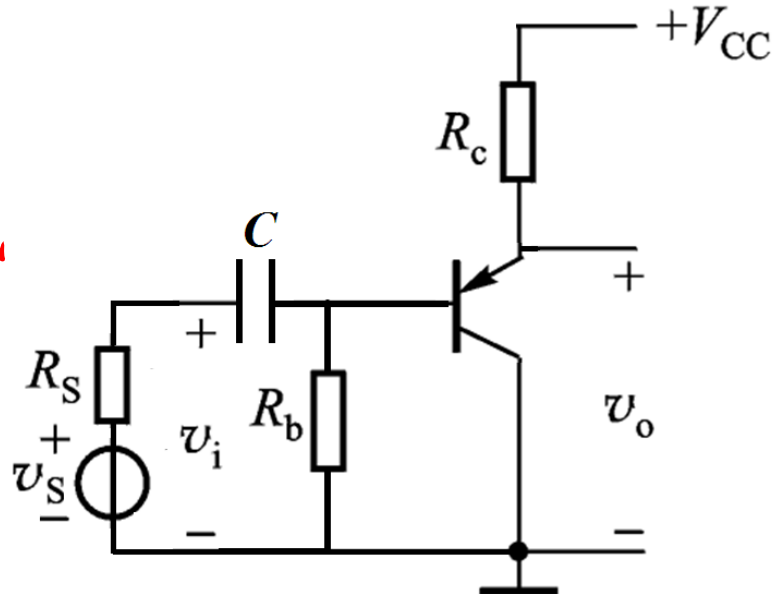


三极管没有处于放大区

改正后:

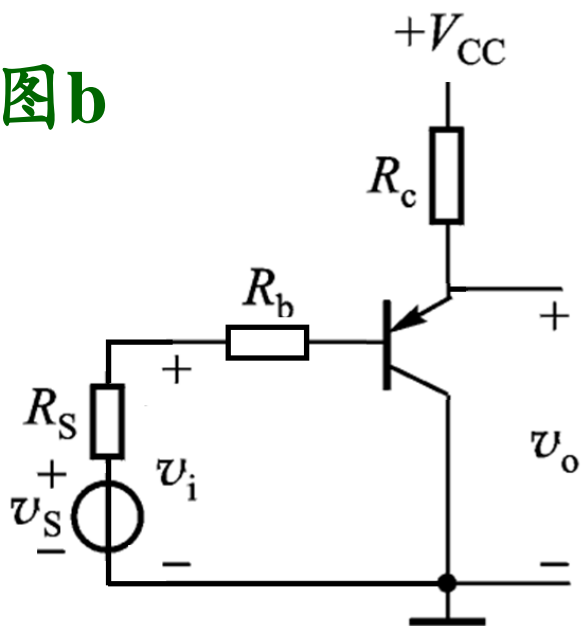


或

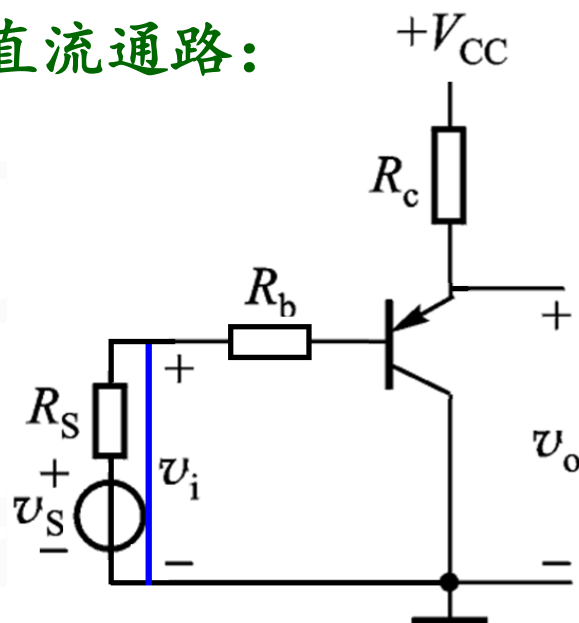




图b



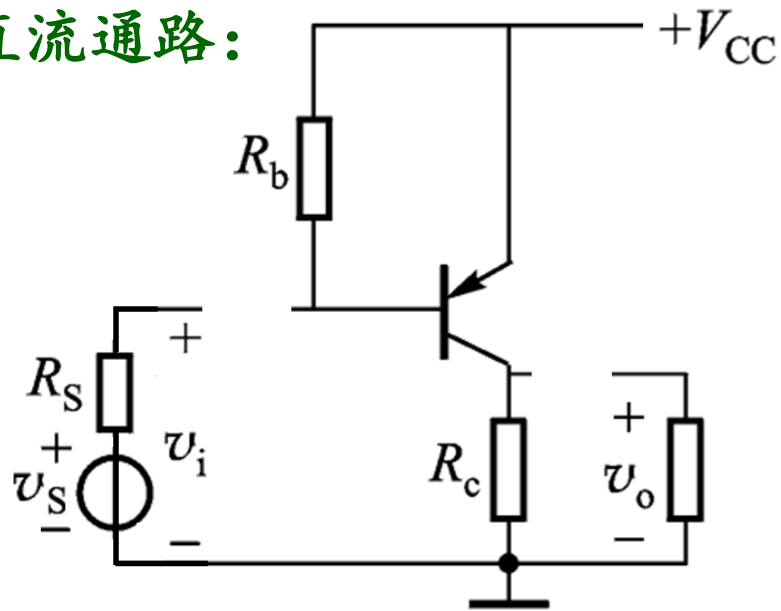
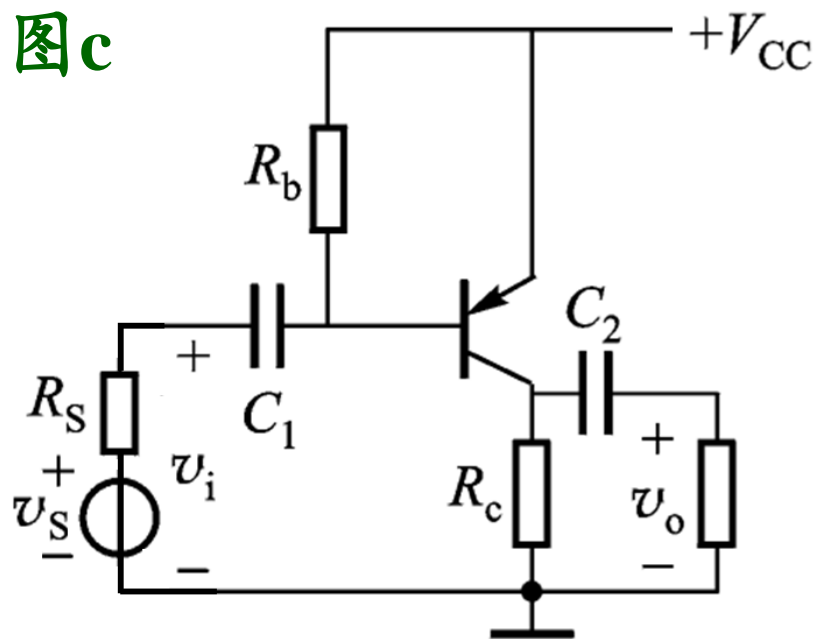
直流通路:



能放大

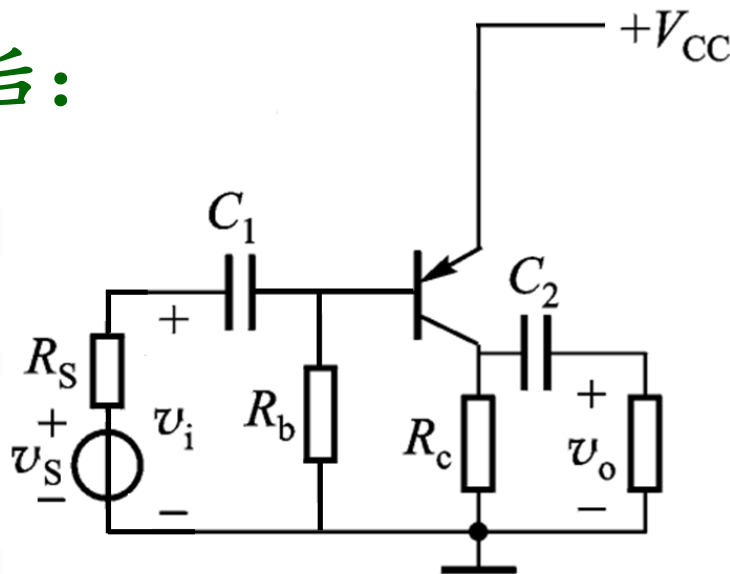
图c

直流通路:



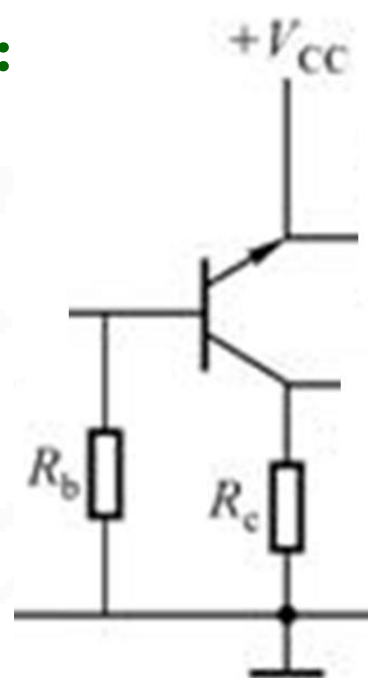
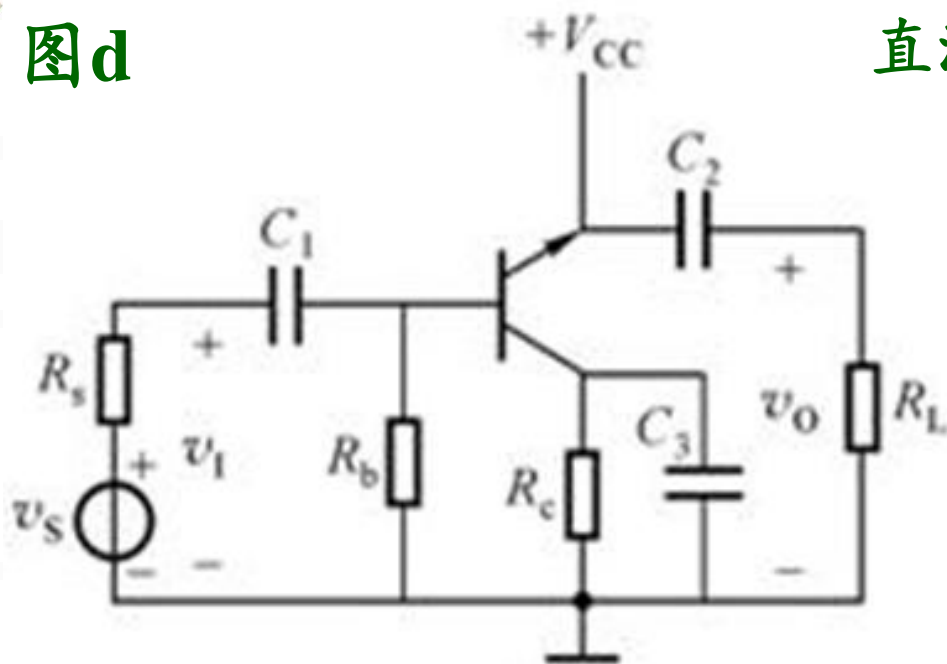
三极管截止

改正后:



图d

直流通路：



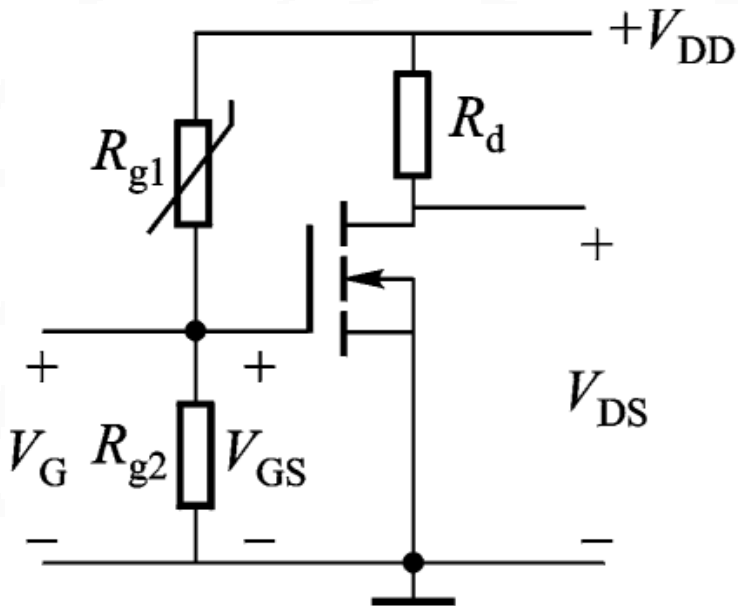
电源极性错

改正：电源改为 $-V_{EE}$ 即可。

2、FET放大电路的直流偏置

场效应管栅极电流为零，是一种压控型有源器件，其漏极电流 I_D 在恒流区内仅取决于栅源电压。FET放大电路的偏置电路有其自身特点。

➤ 栅极固定偏置电路



分压偏置电路

- 栅极电压由电阻分压得到
- 适用于增强型MOS管

$$V_{GSQ} = V_{DD} \frac{R_{g2}}{R_{g1} + R_{g2}}$$

$$I_{DQ} = I_{DO} \left(\frac{V_{GSQ}}{V_T} - 1 \right)^2$$

$$V_{DSQ} = V_{DD} - R_d I_{DQ}$$

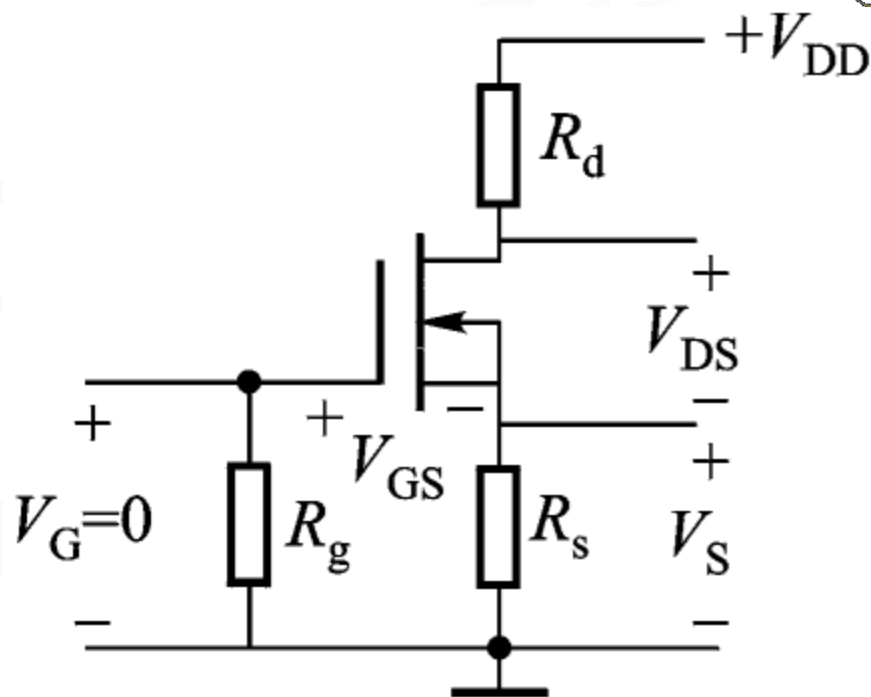
➤ 自偏置电路

✧ R_g 为栅极泄放电阻，泄放栅极感生电荷，并提供栅极与源极间直流电压，通常取 $0.1 \sim 10 \text{M}\Omega$ 。

✧ R_s 为源极偏置电阻，作用类似于共射电路的 R_e ，可以稳定静态工作点。

✧ 适用于耗尽型FET。

✧ 由于 $I_G = 0$ ，所以 R_g 上无直流压降， $V_G = 0$ 。



自偏压偏置电路

✧ 由于耗尽型FET在 $V_{GS} \leq 0$ 时存在导电沟道，所以电路有漏极电流 I_D 。

$$V_{GS} = V_G - V_S = -I_D R_s$$

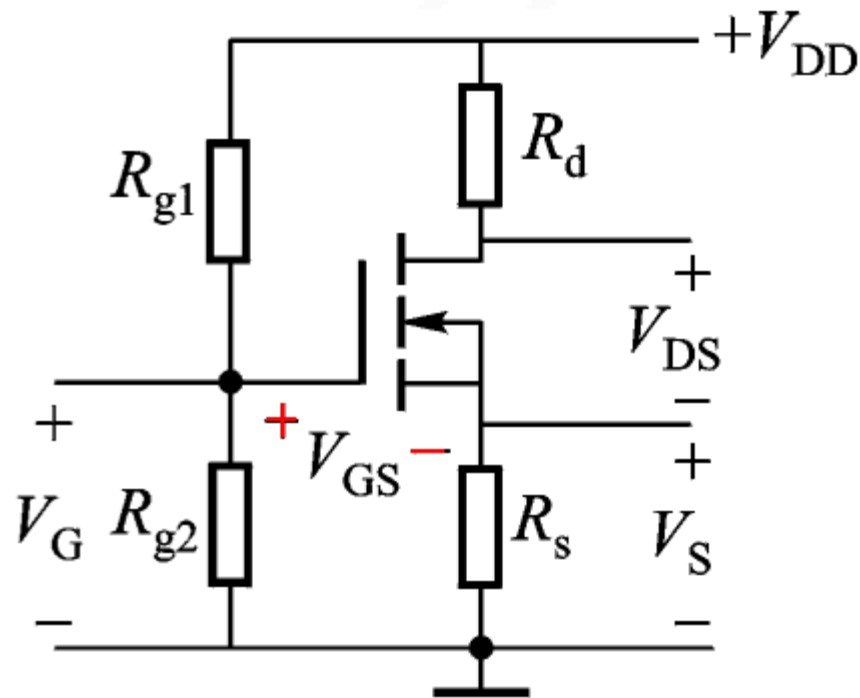
混合偏置电路

- ✧ V_{GS} 与栅极电压有关，还与漏极电流相关。
- ✧ 适用于耗尽型和增强型 FET。

$$\begin{aligned} V_{GS} &= V_G - I_D R_s \\ &= V_{DD} \frac{R_{g2}}{R_{g1} + R_{g2}} - I_D R_s \end{aligned}$$

上式称为 **偏压线方程**

若 $V_G > I_D R_s$ ，则可适用于增强型管（N沟道）；
若 $V_G < I_D R_s$ ，则可适用于耗尽型 MOS 管或 JFET。



分压自偏置电路

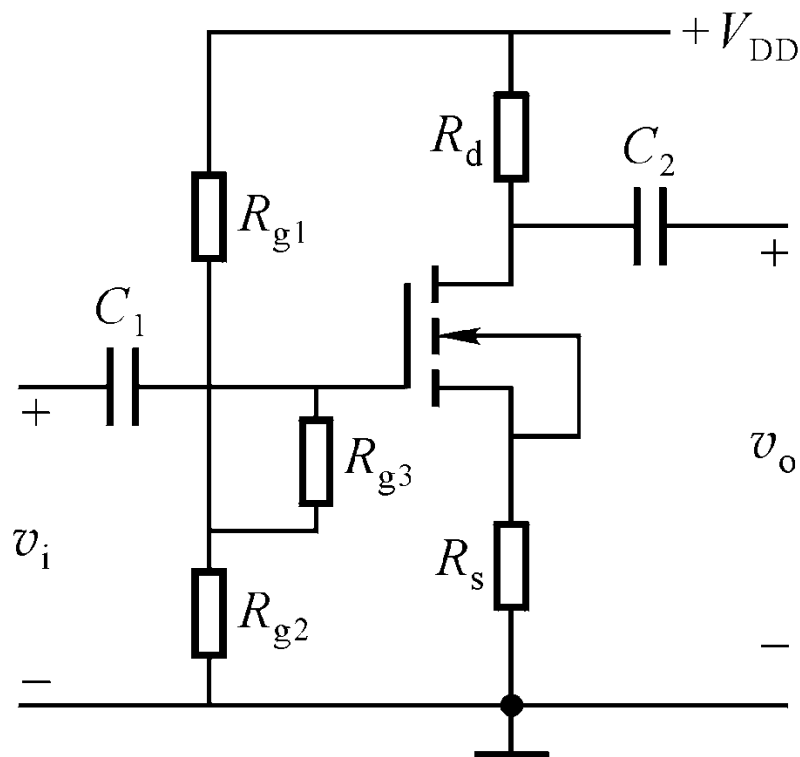
✧ 改进的电路

- 增加 R_{g3} ，以提高输入电阻。
- 由于 $I_G=0$ ， R_{g3} 无压降，静态没有影响。

✧ Q点的确定

解联立方程得到：

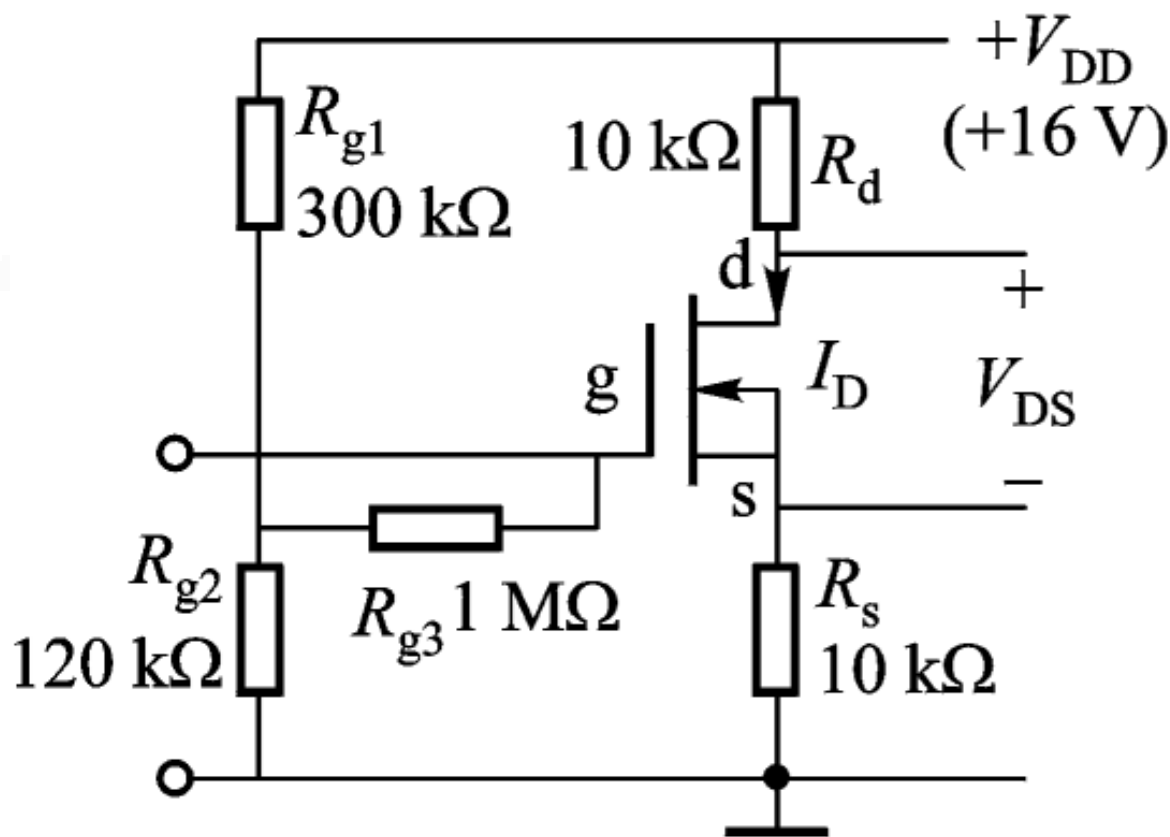
$$\begin{cases} V_{GS} = \frac{R_{g2}}{R_{g1} + R_{g2}} V_{DD} - I_D R_s \\ I_D = I_{DO} \left(\frac{V_{GS}}{V_T} - 1 \right)^2 \end{cases}$$



典型电路

【例4】

已知漏极饱和电流 $I_{DSS}=1\text{mA}$ ，夹断电压 $V_P=-2\text{V}$ 。求静态工作点 (V_{GSQ} 、 I_{DQ} 、 V_{DSQ})，并验证其合理性。





【解】 已知 $I_{DSS}=1\text{mA}$, $V_P=-2\text{V}$

$$\begin{cases} V_{GS} = \frac{120}{300+120} \times 16 - I_D R_s = 4.6 - 10I_D \\ I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)^2 = 1 \times \left(1 - \frac{V_{GS}}{-2}\right)^2 \end{cases}$$

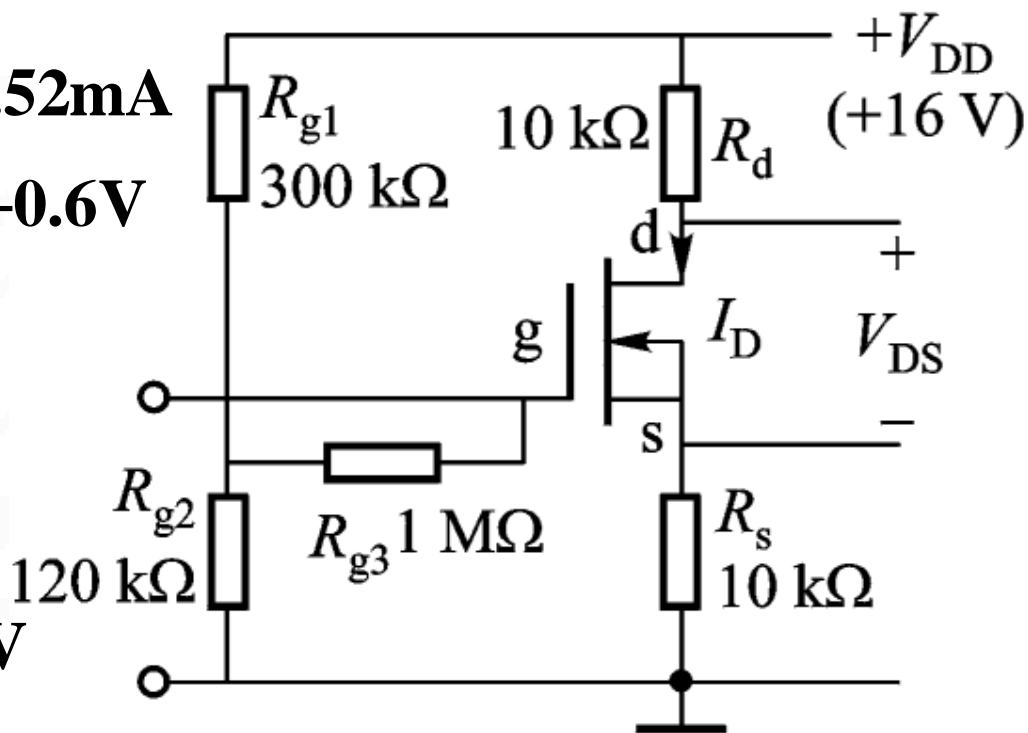
$$\begin{cases} I_{DQ} = 0.84\text{mA} \\ V_{GSQ} = -3.8\text{V} \end{cases} \quad \begin{cases} I_{DQ} = 0.52\text{mA} \\ V_{GSQ} = -0.6\text{V} \end{cases}$$

(舍去)

$$\begin{aligned} V_{DSQ} &= V_{DD} - I_D (R_d + R_s) \\ &= 5.6\text{V} \end{aligned}$$

因 $V_{DSQ} > V_{GSQ} - V_P = 1.4\text{V}$

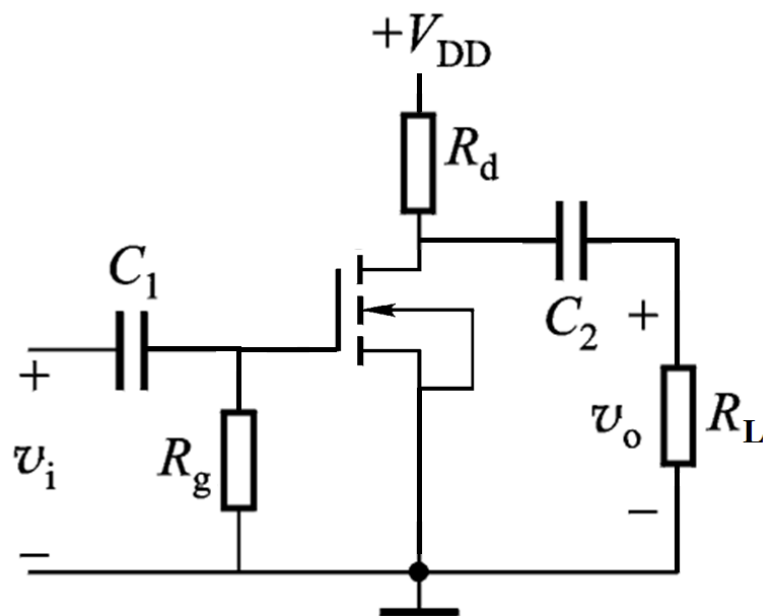
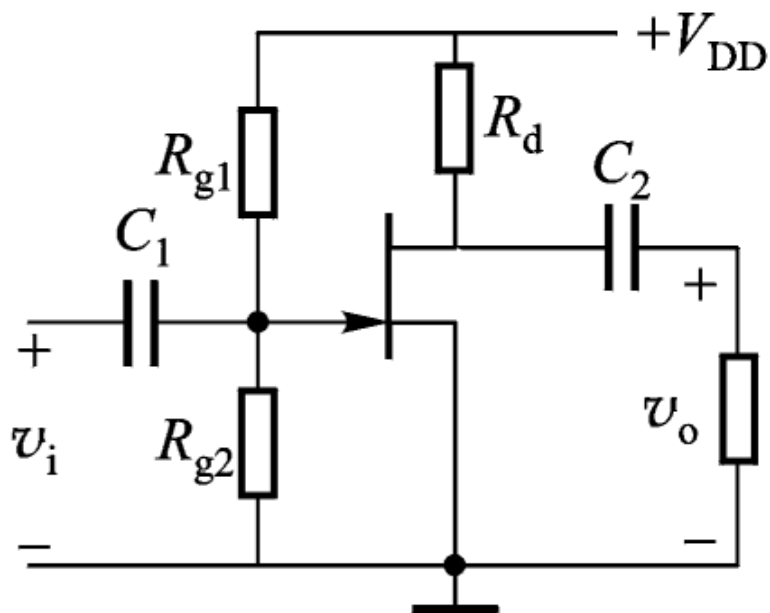
说明FET工作在放大区



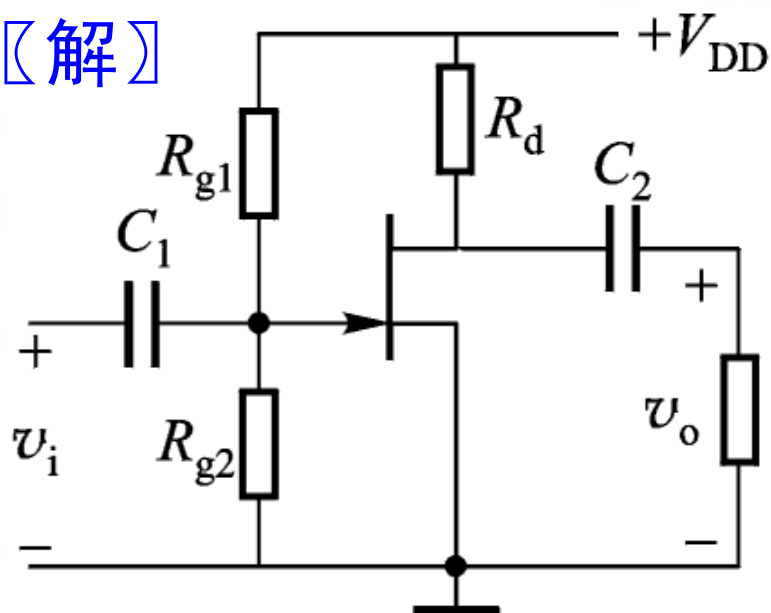


【例5】

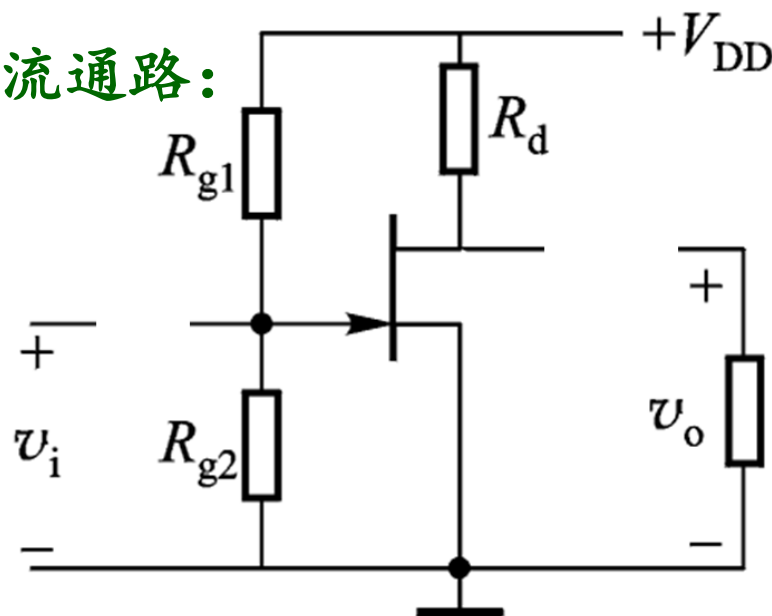
图示场效应管放大电路，根据放大电路的直流通路分析各个放大电路的静态偏置是否符合要求。如发现问题，请指出原因，并画出正确的电路。



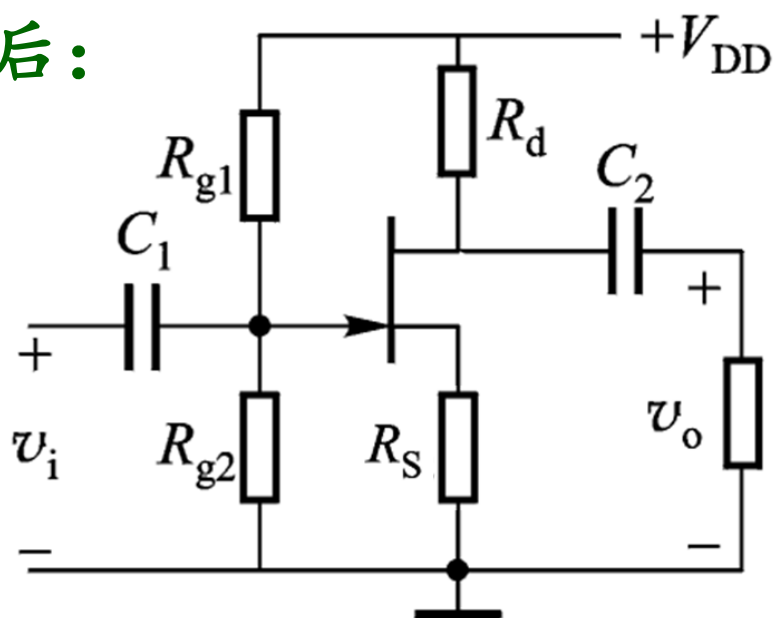
【解】



直流通路:



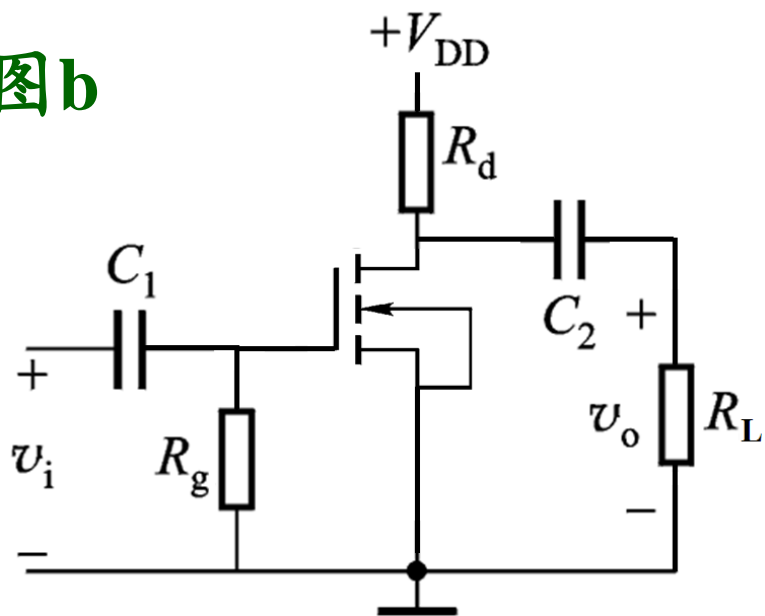
改正后:



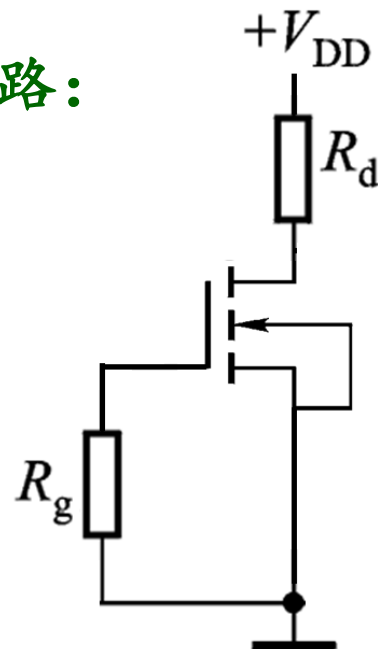
$V_{GS} > 0$, JFET不可以



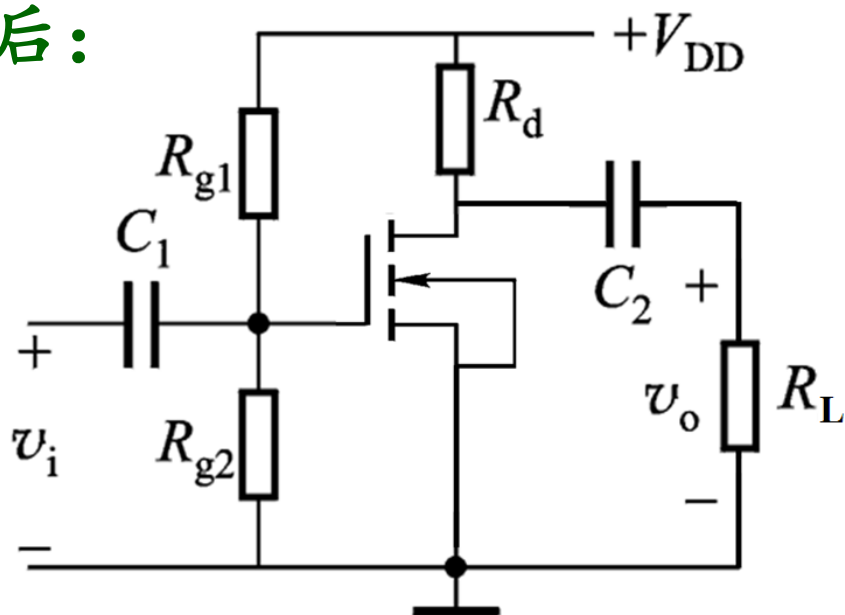
图b



直流通路:

 $V_{GS}=0$, FET截止

改正后:



二、交流通路与小信号模型

- ✧ 放大电路的动态分析是在静态分析之后，根据放大电路的**交流通路**，计算放大电路的性能指标（电压放大倍数、输入电阻、输出电阻等）。
- ✧ 动态分析的基本思想是利用三极管在放大区内的线性化模型，画出**微变等效电路**进行分析计算。
- ✧ 放大电路动态分析的一般步骤：
 - ① 求静态工作点，根据 Q 点计算小信号模型参数；
 - ② 确定交流通路，画出**微变等效电路**；
 - ③ 计算动态性能指标（如 A_v 、 R_i 、 R_o ）。
- ✧ 放大电路的动态性能与其**组态**息息相关。



1、交流通路

当输入信号，即 $v_i \neq 0$ 时电路所处的状态称为**动态**。

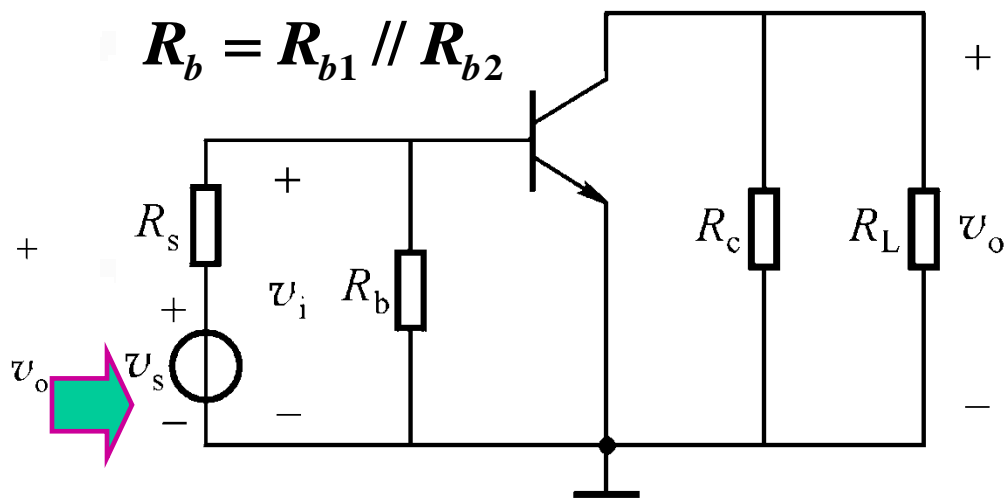
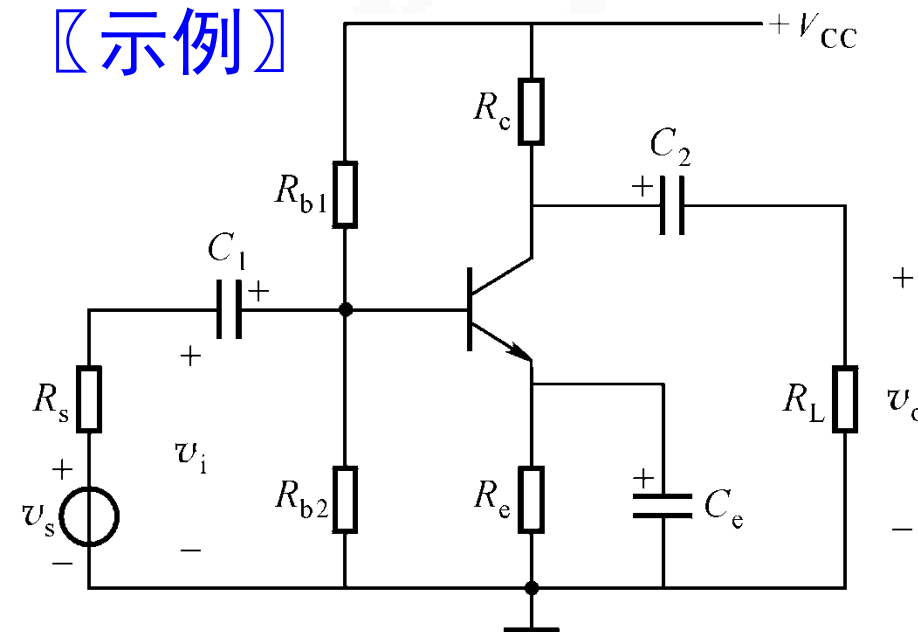
- ✧ 输入电压变化会引起三极管中电流、电压及输出电压的**变化**。
- ✧ 三极管中电流、电压是**在静态的基础上变化**。
- ✧ 电路中交流分量的计算过程称为**动态分析**，也称为**交流分析**。动态分析应根据**交流通路**进行计算。
- ✧ 根据静态分析得到放大电路的直流分量，根据动态分析得到放大电路的交流分量，两者的叠加就是放大电路的实际波形（瞬时量）。



✧ 交流通路的画法

- 所有**电容**当作交流短路；（ \because 容量设计得很大，容抗很小， \therefore 可忽略不计。）
- 所有**直流电源**当作交流短路。（ \because 理想电压源对交流信号而言，其交流变化量为零， \therefore 可忽略不计。）

【示例】

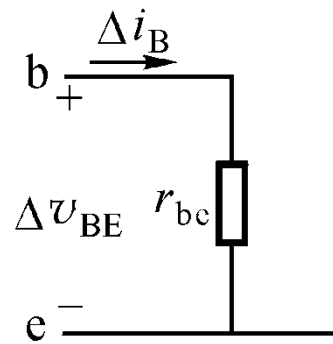
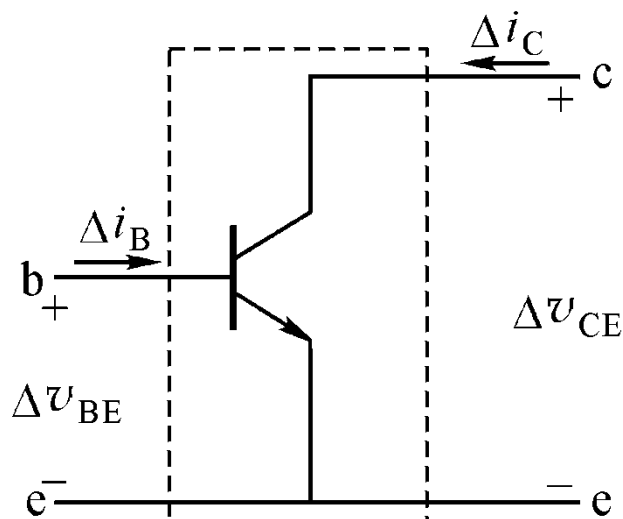
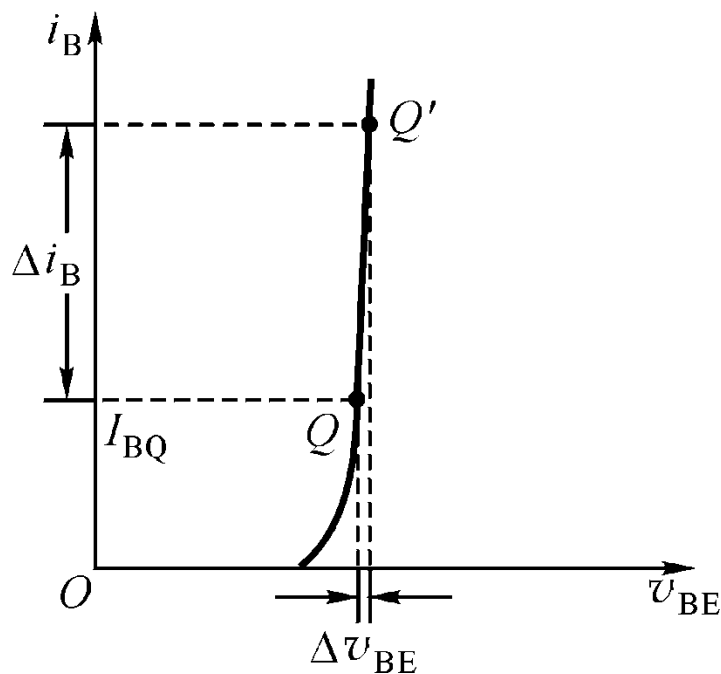


交流通路



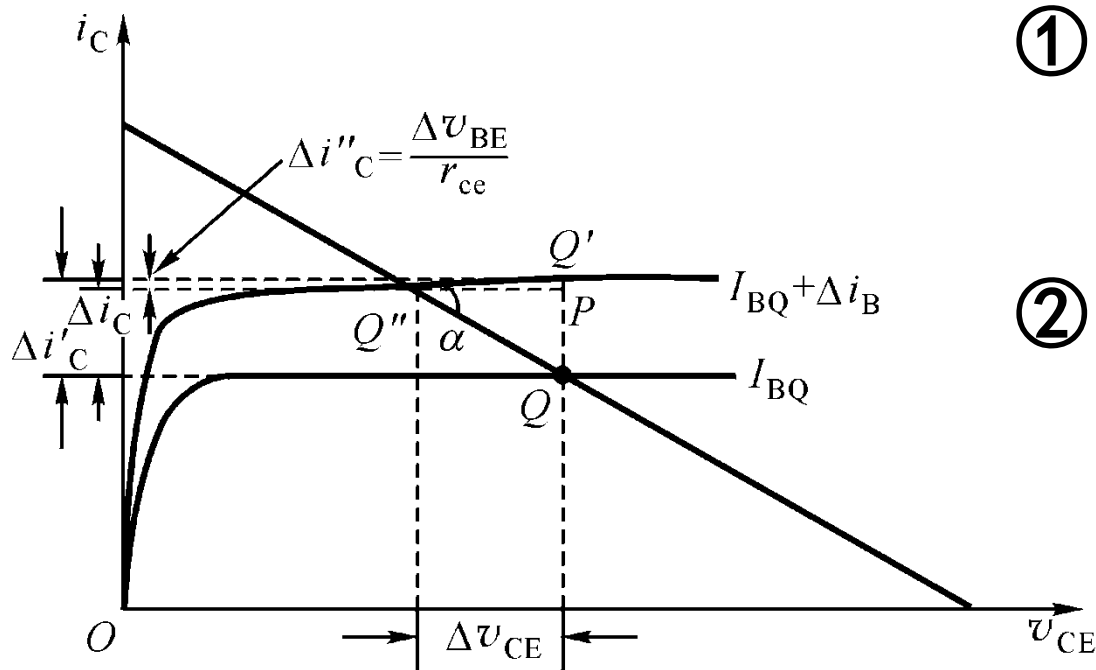
2、晶体管的低频小信号模型

➤ 三极管的低频小信号模型



(1) **输入回路：** b-e之间等效为**动态电阻** r_{be} 。

(2) **输出回路**：集电极电流的变化 Δi_C 可以看作 Δi_B 和 Δv_{CE} 分别单独变化时引起的。



① 当 $v_{CE} = V_{CEQ}$ 不变时，

$$\Delta i'_C = \beta \Delta i_B$$

② 当 $i_B = I_{BQ} + \Delta i_B$ 不变时，

$$r_{ce} = \frac{\Delta v_{CE}}{\Delta i''_C} = \frac{1}{\tan \alpha}$$

$$\Delta i''_C = \frac{\Delta v_{CE}}{r_{ce}}$$

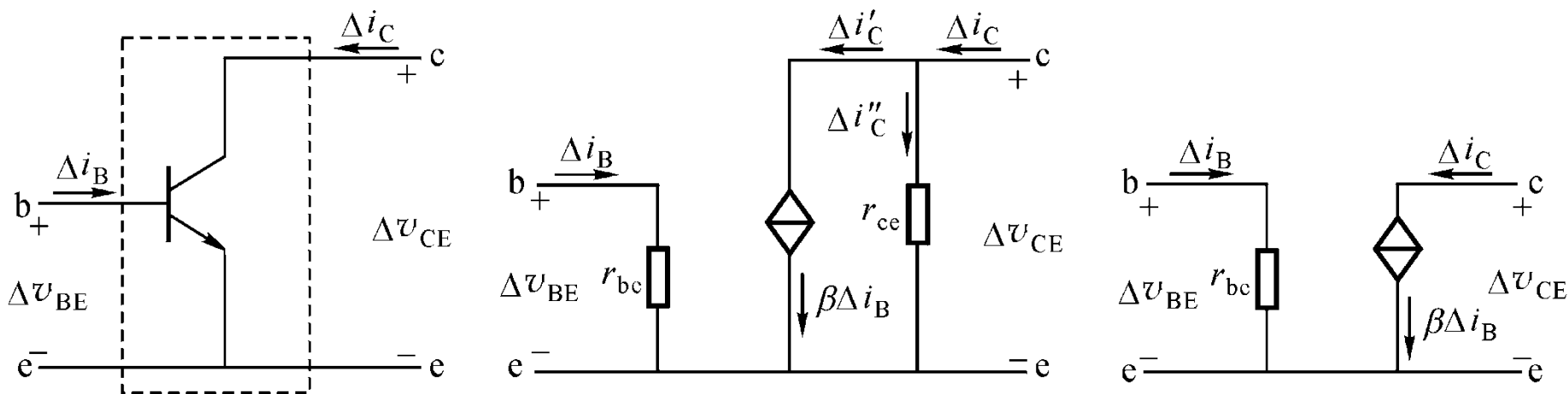
当 Δi_B 和 Δv_{CE} 同时作用时，

$$\Delta i_C = \Delta i'_C + \Delta i''_C = \beta \Delta i_B + \frac{\Delta v_{CE}}{r_{ce}}$$



$$\Delta i_C = \Delta i'_C + \Delta i''_C = \beta \Delta i_B + \frac{\Delta v_{CE}}{r_{ce}}$$

所以，输出回路c-e间的模型由**受控电流源**“ $\beta \Delta i_B$ ”和c-e间**动态输出电阻** r_{ce} 并联组成。



动态输出电阻 r_{ce} 一般**很大**，通常可以忽略。

若 $r_{ce} = \infty$ ，则三极管输出特性曲线是怎么样？

☆ 在应用三极管低频小信号模型时应注意：

①小信号模型为线性化模型，只适用于**低频小信号**。

②**变化量**或**交流分量**，不允许出现直流量或瞬时量符号。

③微变参数，**与Q点有关**，不是固定常数。

④电流源“ $\beta\Delta i_B$ ”方向和大小由 Δi_B 决定。

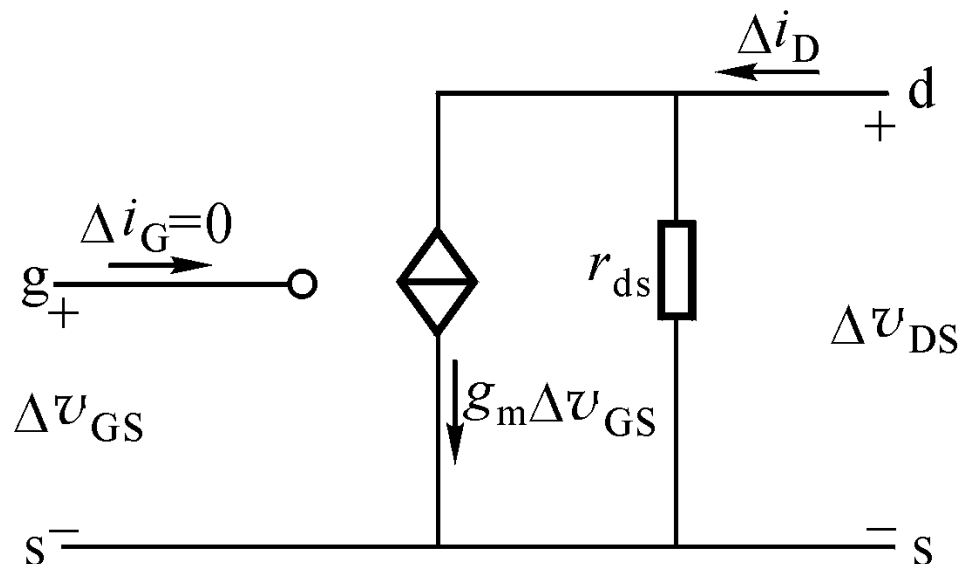
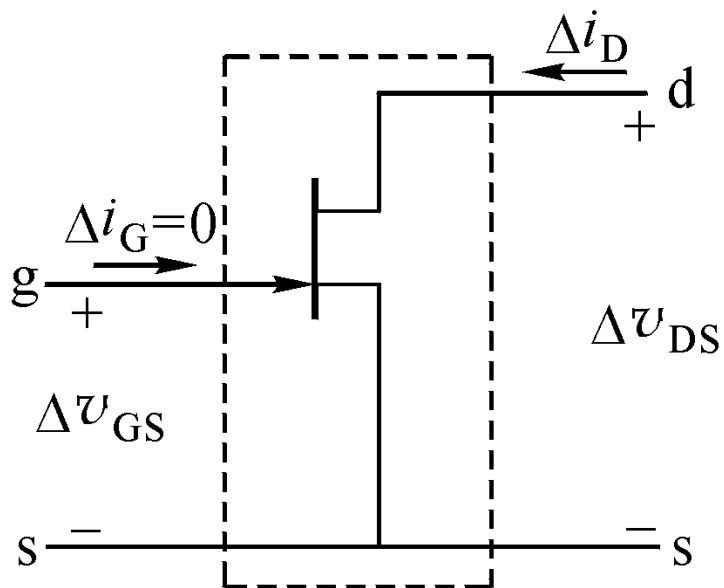
无论对NPN型或PNP型都是如此。

⑤ r_{be} 可用公式估算：

$$r_{be} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{V_T}{I_{EQ}} \quad \begin{array}{l} r_{bb'} \text{ 约为 } 100 \sim 300 \Omega \\ V_T = 26 \text{ mV} \end{array}$$

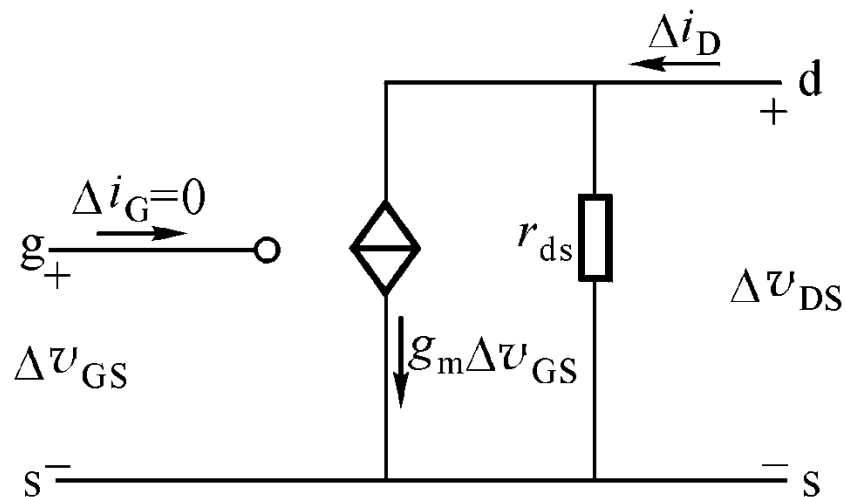
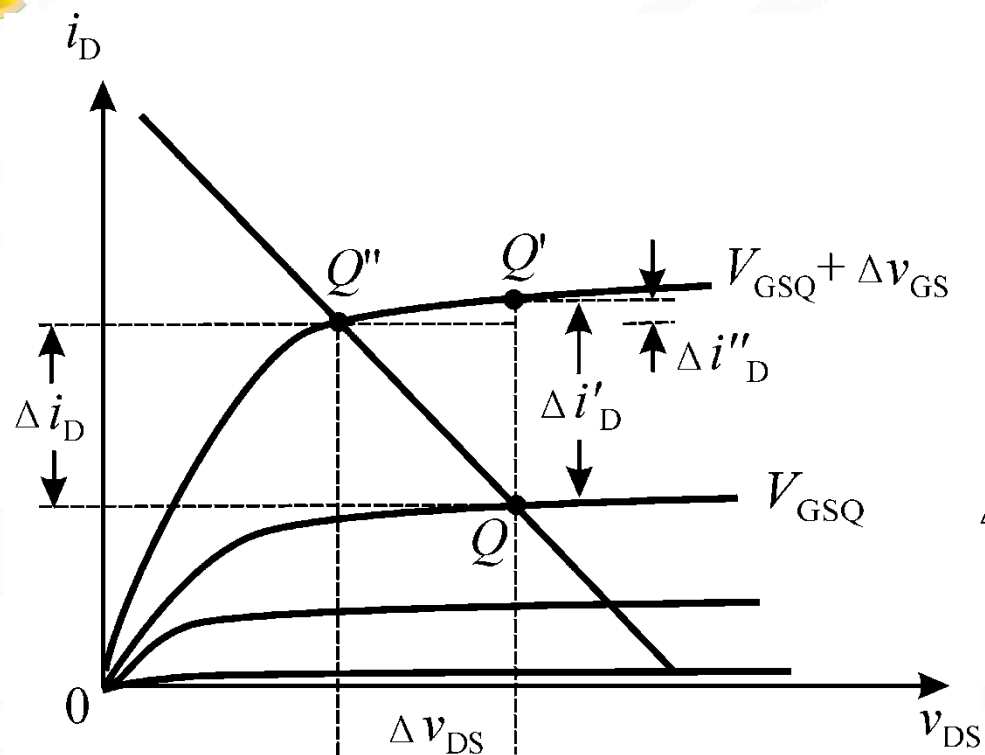
⑥低频小信号模型也可由双口网络方程导出，因此也称为**H参数模型**。

➤ 场效应管的低频小信号模型



输入回路：由于场效应管的**栅极电流为零**，输入回路栅极源极之间可用开路来等效。

输出回路：受控电流源“ $g_m \Delta v_{GS}$ ”和动态电阻 r_{ds} 并联。



g_m : 低频跨导, 它表征了 Δv_{GS} 对 Δi_D 的控制能力。

r_{ds} : 输出电阻 (动态电阻), 通常可忽略。

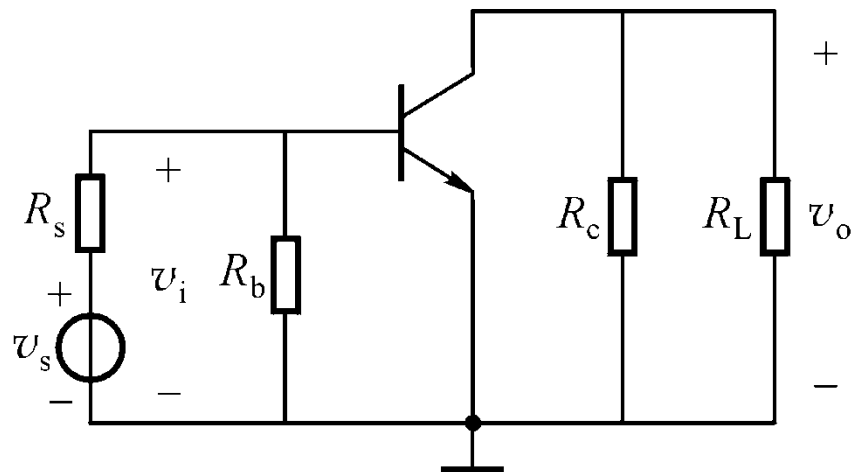
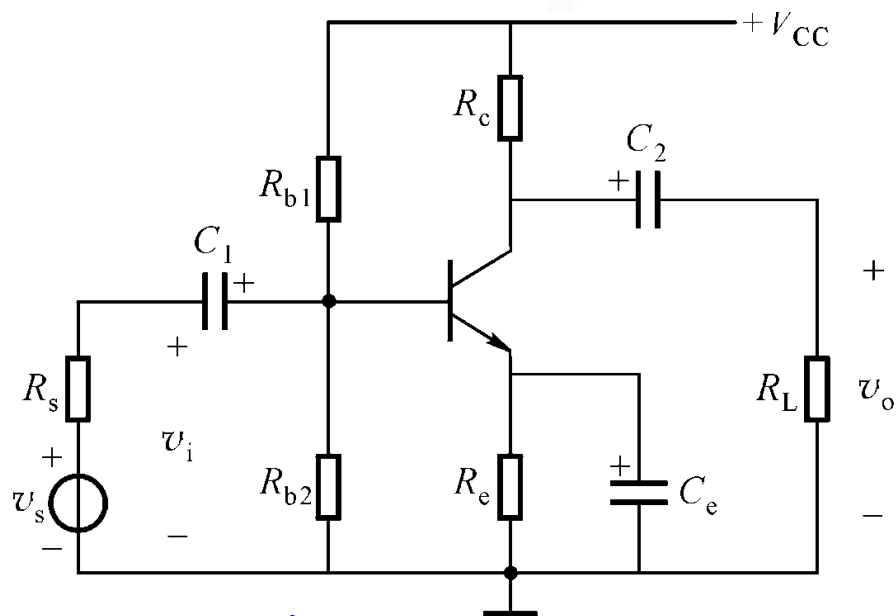
受控电流源方向: 对6种类型FET都适用。



三、三极管放大电路的动态分析

➤ 放大电路的三种基本组态

✧ 共射组态 (CE)

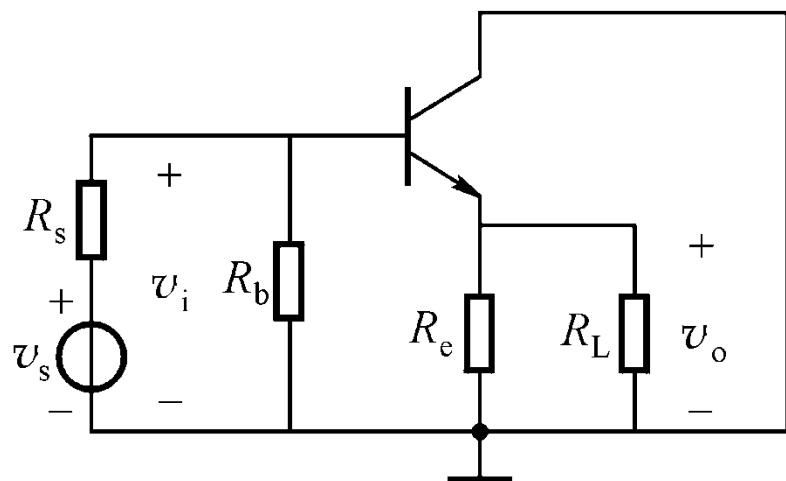
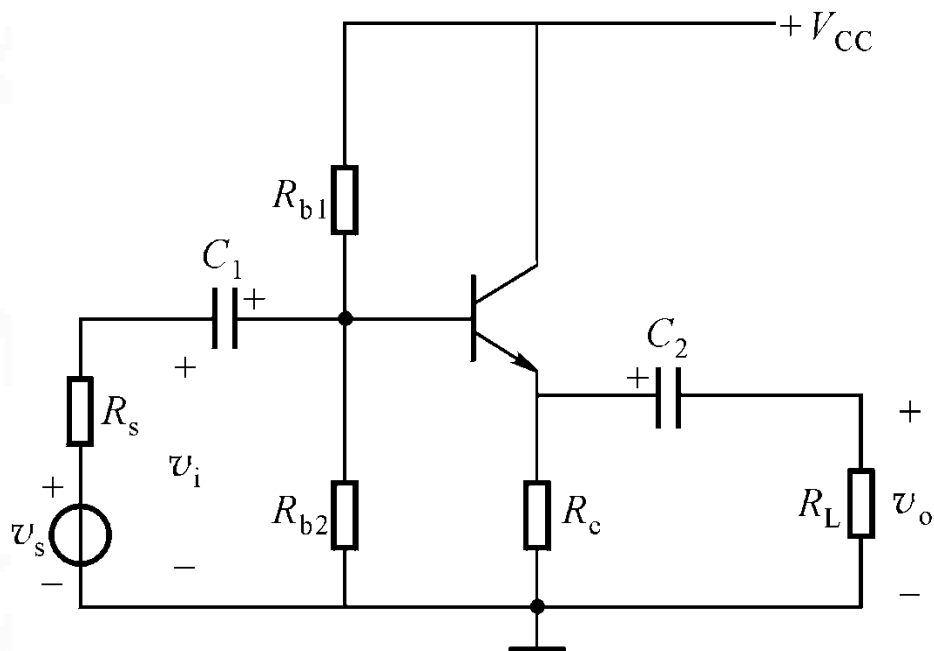


共射组态的识别:

- 发射极是输入、输出回路的公共端(交流接地)
- 输入信号加到基极, 输出信号从集电极上取出



◇ 共集组态 (CC)

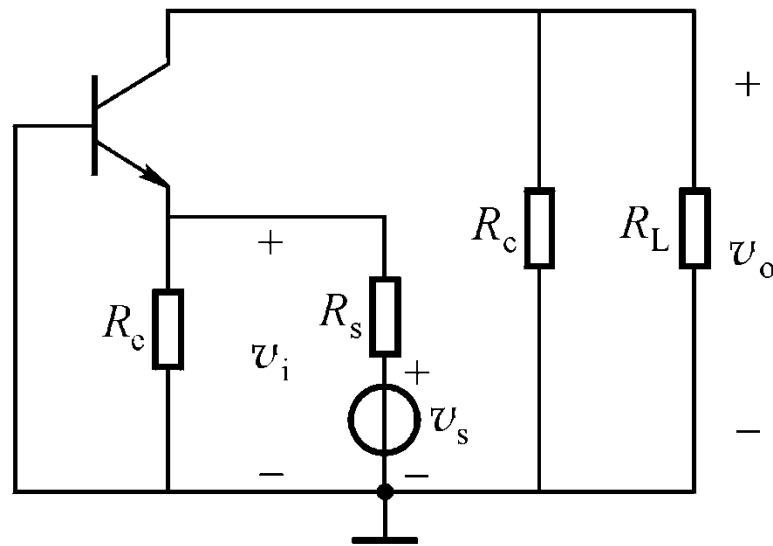
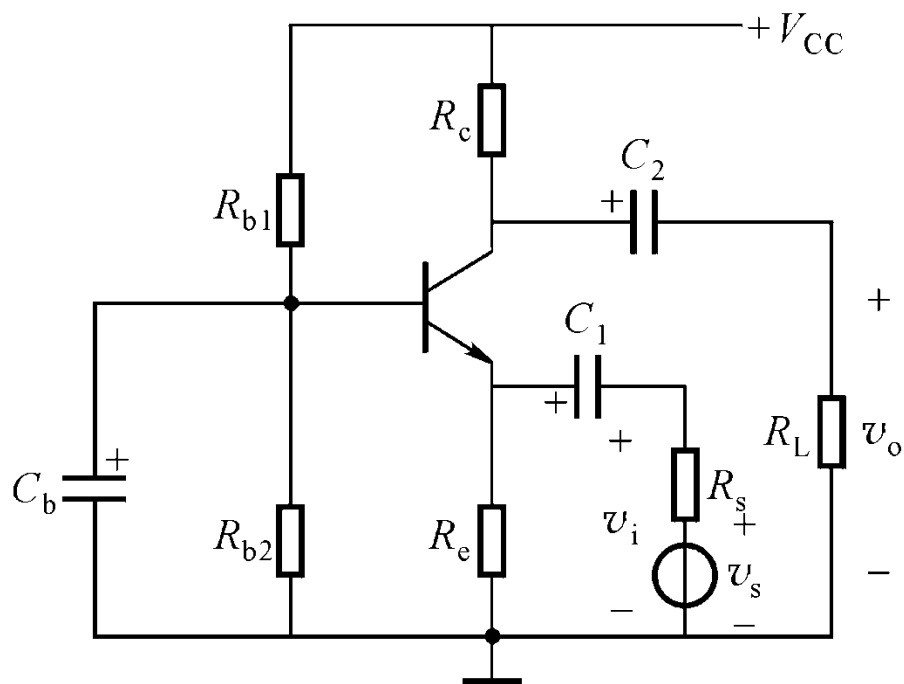


共集组态的识别:

- 集电极是输入、输出回路的公共端(交流接地)
- 输入信号加到基极, 输出信号从发射极上取出



✧ 共基组态 (CB)



共基组态的识别:

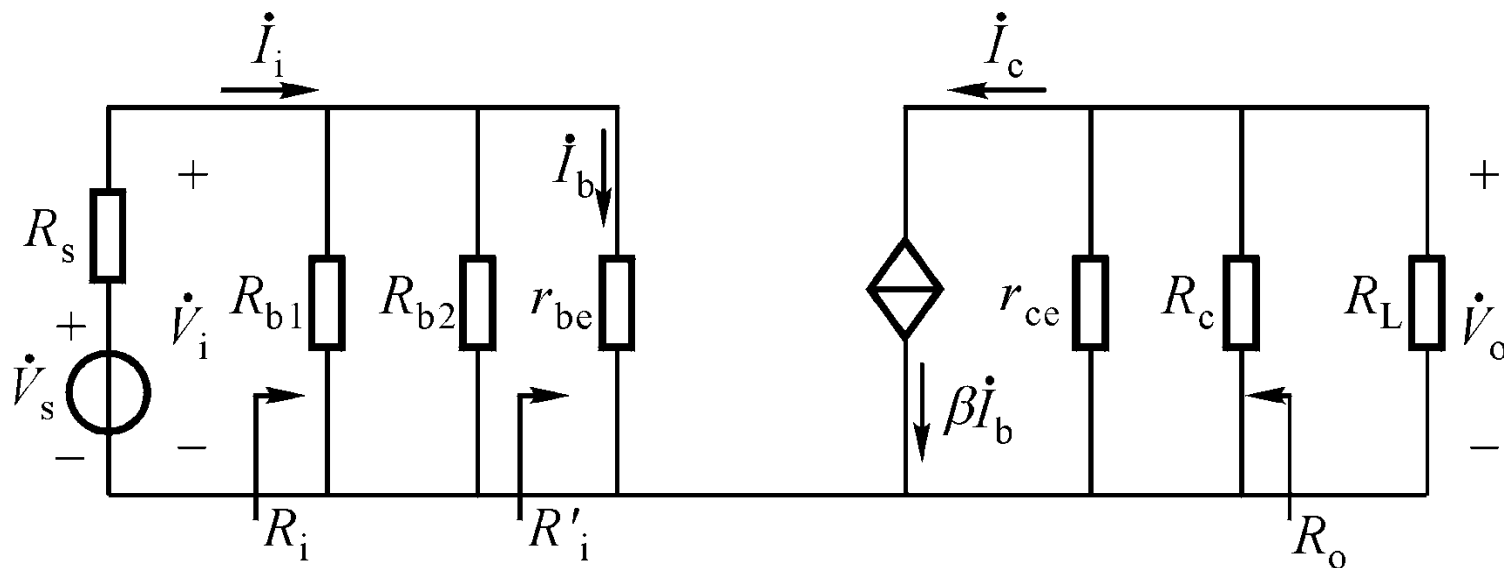
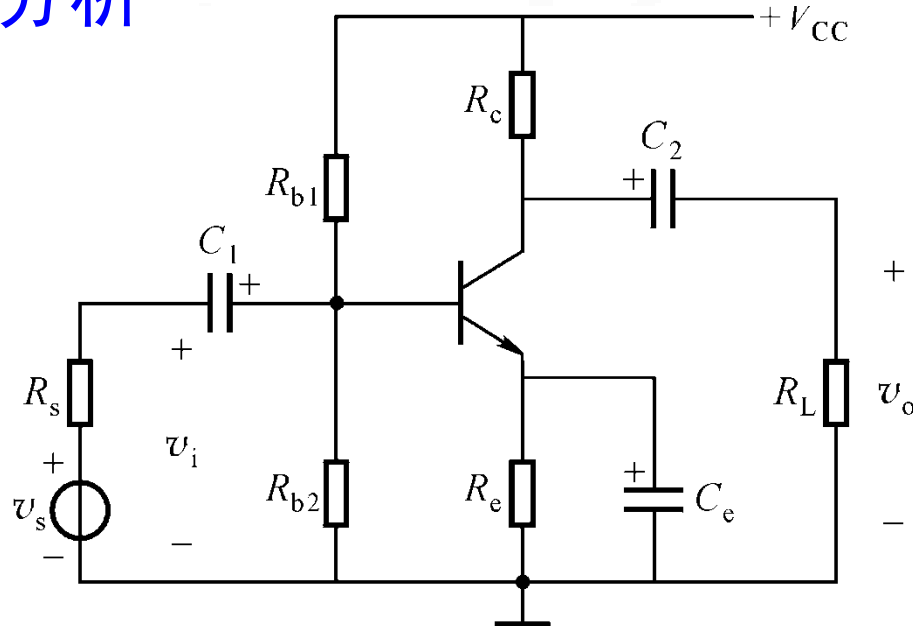
- 基极是输入、输出回路的公共端(交流接地)
- 输入信号加到发射极, 输出信号从集电极上取出

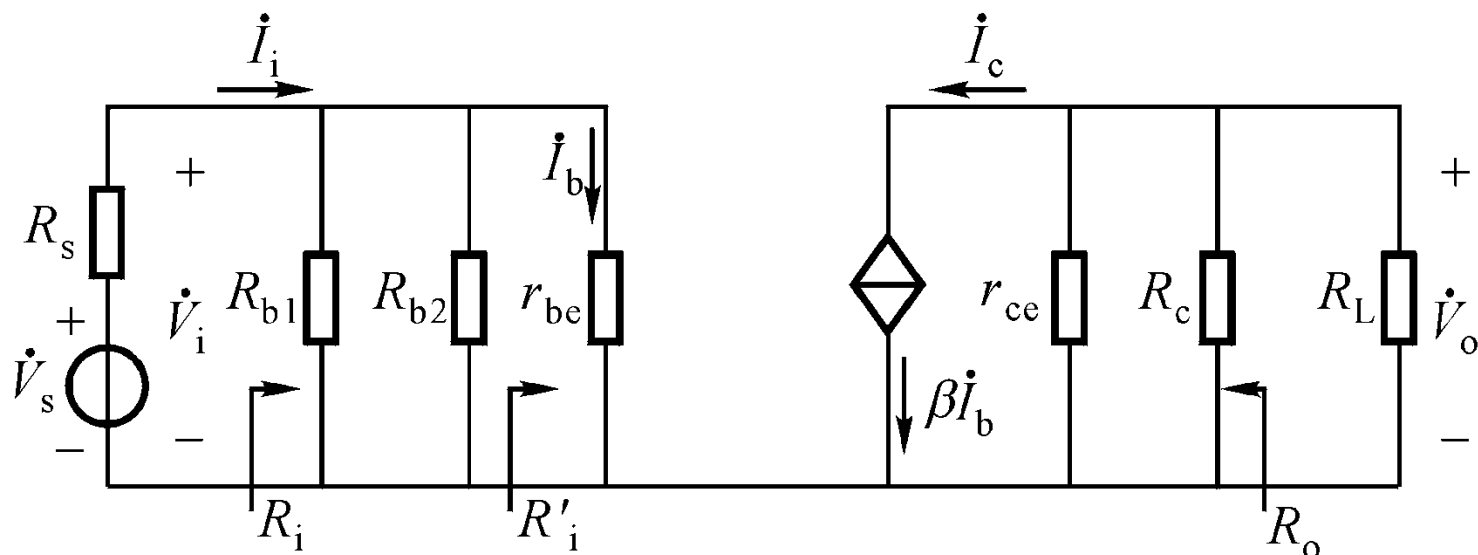


1、共射放大电路的动态分析

①求电压放大倍数：

$$\begin{aligned}\dot{A}_v &= \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i} = \frac{-\beta \dot{I}_b R'_L}{\dot{I}_b r_{be}} \\ &= -\frac{\beta R'_L}{r_{be}}\end{aligned}$$





② 计算输入电阻:

$$R_i = \frac{\dot{V}_i}{\dot{I}_i} = \frac{\dot{V}_i}{\frac{\dot{V}_i}{R_{b1}} + \frac{\dot{V}_i}{R_{b2}} + \frac{\dot{V}_i}{r_{be}}}$$

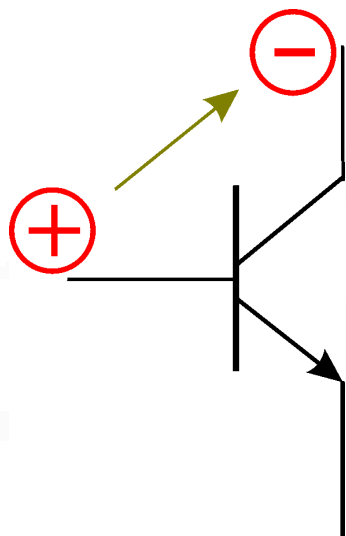
$$= R_{b1} // R_{b2} // r_{be} = R_b // r_{be}$$

③ 计算输出电阻: 输入信号源短路, 负载开路, 在输出端外加一个电压源。

$$R_o = R_c // r_{ce} \approx R_c$$

➤ 共射放大电路的特点：

✧ 输出电压与输入电压的相位相反。



$$v_B \uparrow \Rightarrow i_B \uparrow \Rightarrow i_C \uparrow \Rightarrow v_C \downarrow$$

✧ 共射放大电路具有较大的电压放大倍数。

✧ 输入电阻和输出电阻较大。

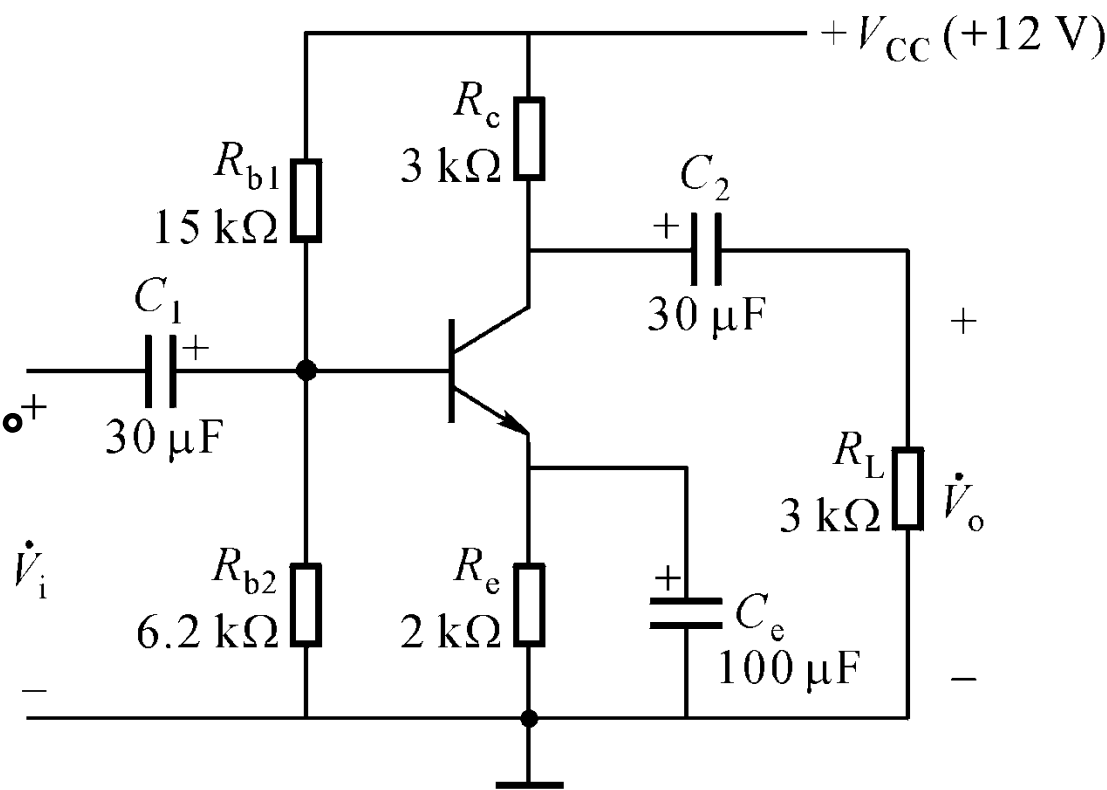
✧ 应用广泛，特别适合于电压放大。



【例1】

三极管CE放大电路如图所示，设三极管在静态工作点附近的 $\beta=50$ ， $r_{bb'}=200\ \Omega$ 。试计算：

- (1) A_v 、 R_i 、 R_o ；
- (2) 若改用 $\beta=100$ 的三极管，重新计算 A_v 、 R_i 、 R_o ；
- (3) 若不接 C_e ，对电路的性能指标有何影响？
- (4) 求(1)的最大不失真输出电压。





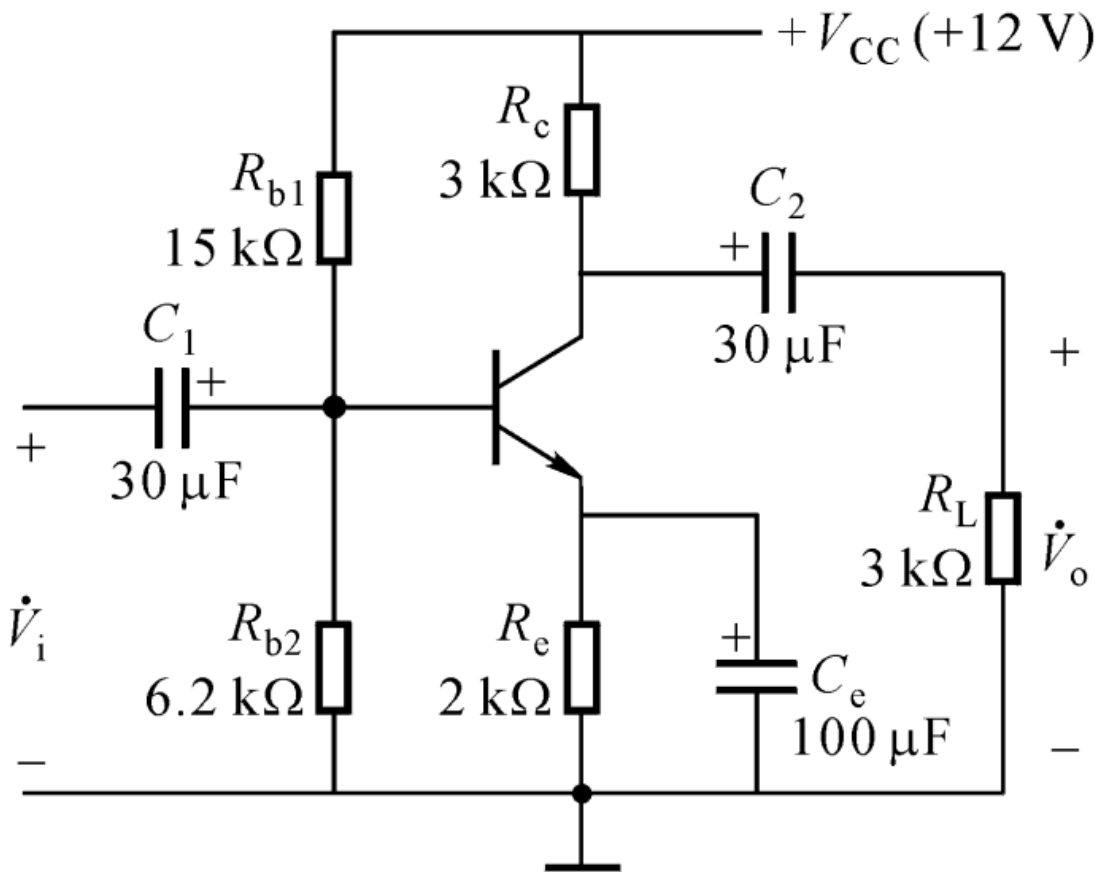
【解】 (1)

$$V'_B = \frac{R_{b2}V_{CC}}{R_{b1} + R_{b2}} = \frac{6.2 \times 12}{15 + 6.2} = 3.5\text{V}$$

$$R_b = R_{b1} // R_{b2} = 15 // 6.2 = 4.4\text{ k}\Omega$$

$$I_{BQ} = \frac{V'_B - 0.7}{R_b + (1 + \beta)R_e} = \frac{3.5 - 0.7}{4.4 + 51 \times 2} = 0.026\text{mA}$$

$$I_{EQ} \approx I_{CQ} = \beta \cdot I_{BQ} = 1.3\text{mA}$$





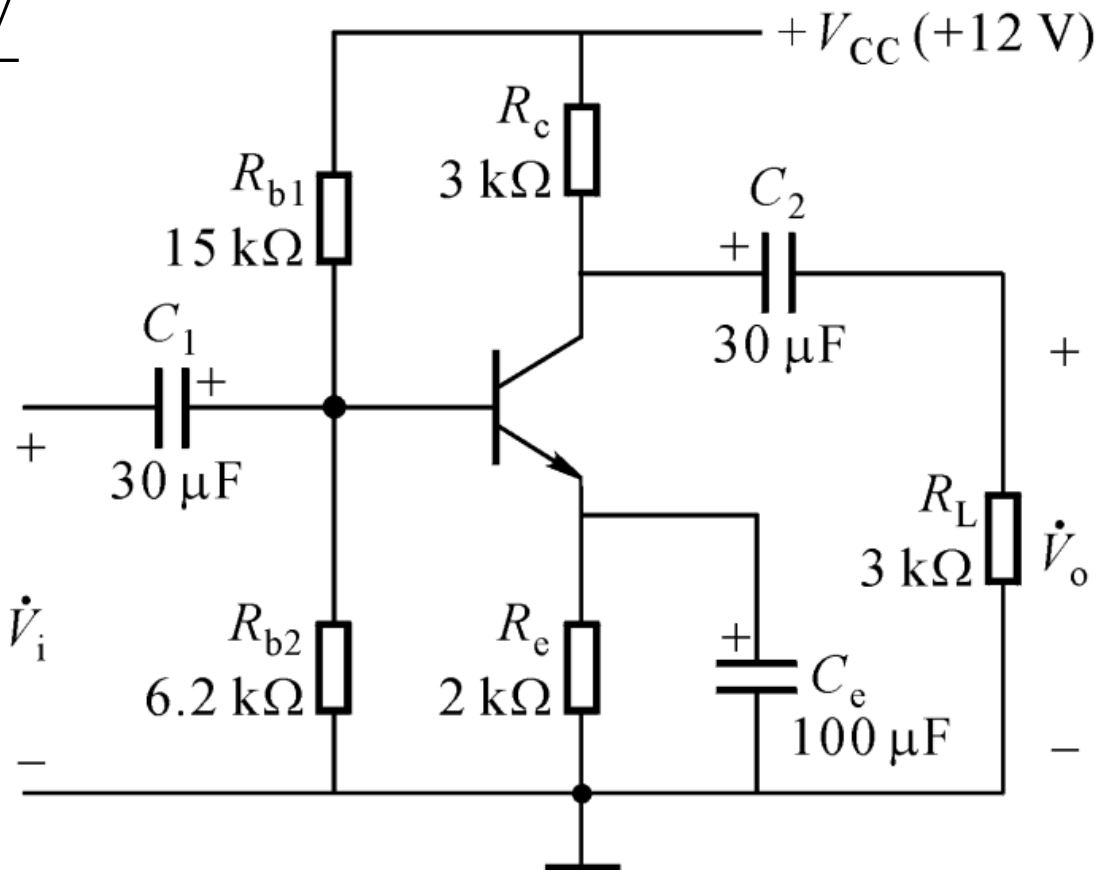
$$r_{be} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{26 \text{ mV}}{I_{EQ}}$$

$$= 200 + 51 \times \frac{26}{1.3}$$

$$= 1.2 \text{ k}\Omega$$

$$\dot{A}_v = - \frac{\beta (R_c // R_L)}{r_{be}}$$

$$= - \frac{50 \times (3 // 3)}{1.2} \approx -62$$



$$R_i = R_{b1} // R_{b2} // r_{be} = 0.94 \text{ k}\Omega$$

$$R_o = R_c // r_{ce} \approx R_c = 3 \text{ k}\Omega$$

(2) 若改用 $\beta=100$ 的三极管。

$$I_{BQ} = \frac{3.5 - 0.7}{4.4 + 101 \times 2} = 0.0136 \text{mA}$$

$$I_{EQ} \approx I_{CQ} = 1.36 \text{ mA}$$

$$r_{be} = 200 + 101 \times \frac{26}{1.36} = 2.1 \text{k}\Omega$$

$$\dot{A}_v = -\frac{100 \times (3 // 3)}{2.1} \approx -71$$

$$R_i = 15 // 6.2 // 2.1 \approx 1.4 \text{k}\Omega$$

$$R_o \approx R_c = 3 \text{k}\Omega$$

	$\beta=50$	$\beta=100$
A_v	-62	-71
I_{EQ}	1.3mA	1.36mA
r_{be}	1.2k Ω	2.1k Ω

β 增大一倍， A_v 基本不变，为什么？

R_e 能抑制温漂，稳定静态工作点，还允许 β 在一定范围内选择。

(3) 若不接 C_e , 先画出等效电路。

$$\dot{A}_v = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i}$$

$$= -\frac{\beta(R_c // R_L)}{r_{be} + (1 + \beta)R_e}$$

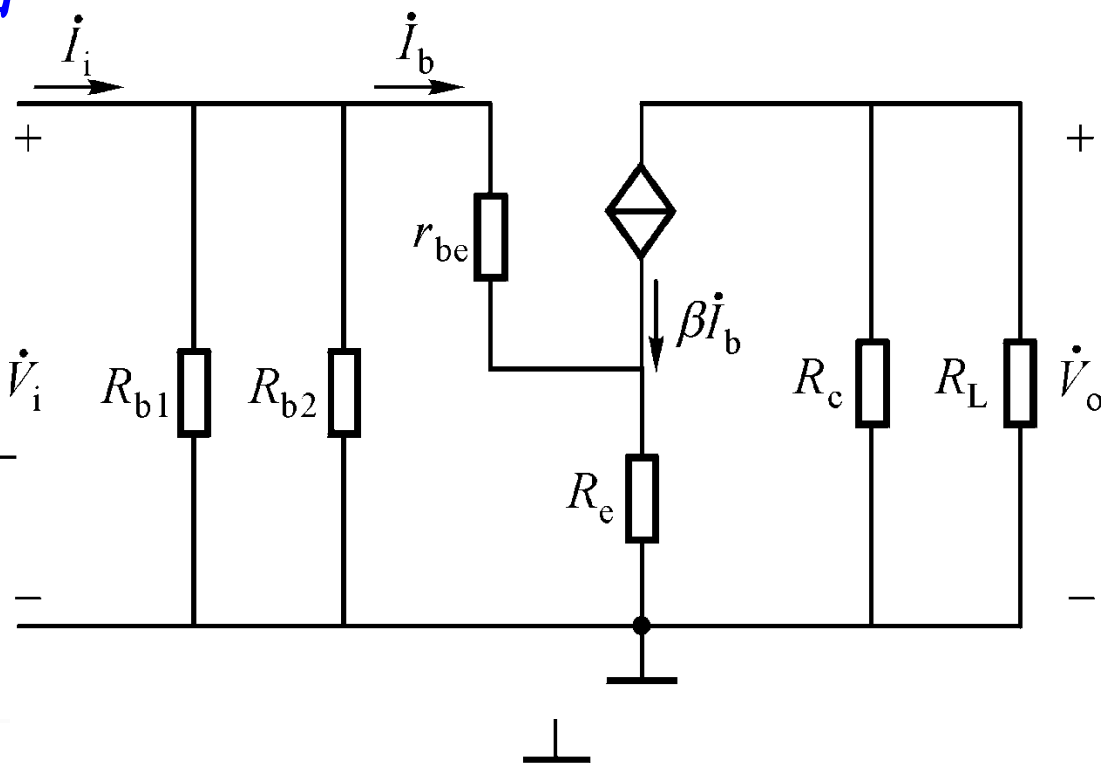
$$= -\frac{50 \times (3 // 3)}{1.2 + 51 \times 2}$$

$$= -0.73$$

$$R_i = R_{b1} // R_{b2} // [r_{be} + (1 + \beta)R_e]$$

$$= 15 // 6.2 // [1.2 + 51 \times 2] \approx 4.2 \text{ k}\Omega$$

$$R_o = R_c = 3 \text{ k}\Omega$$



为什么需要接旁路电容 C_e ?

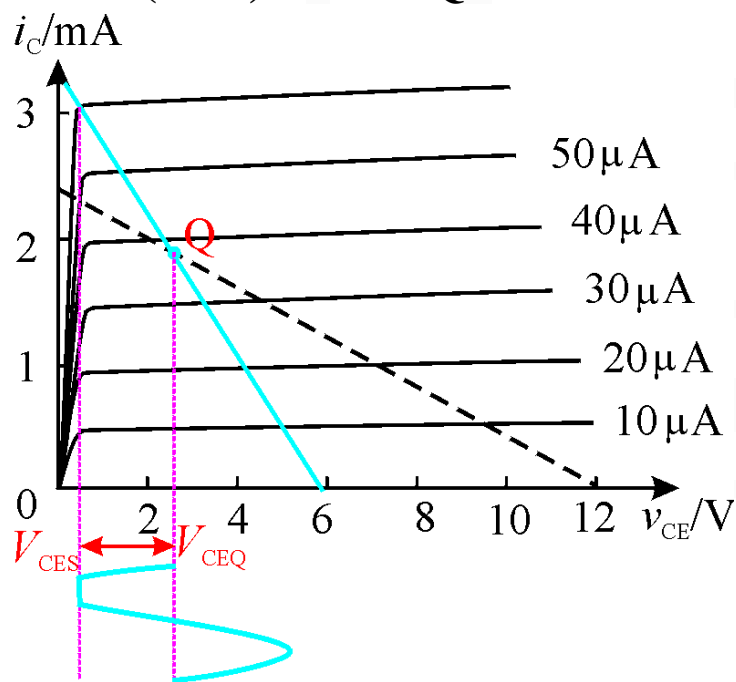


(4) 求最大不失真输出电压。

最大不失真输出电压的确定：

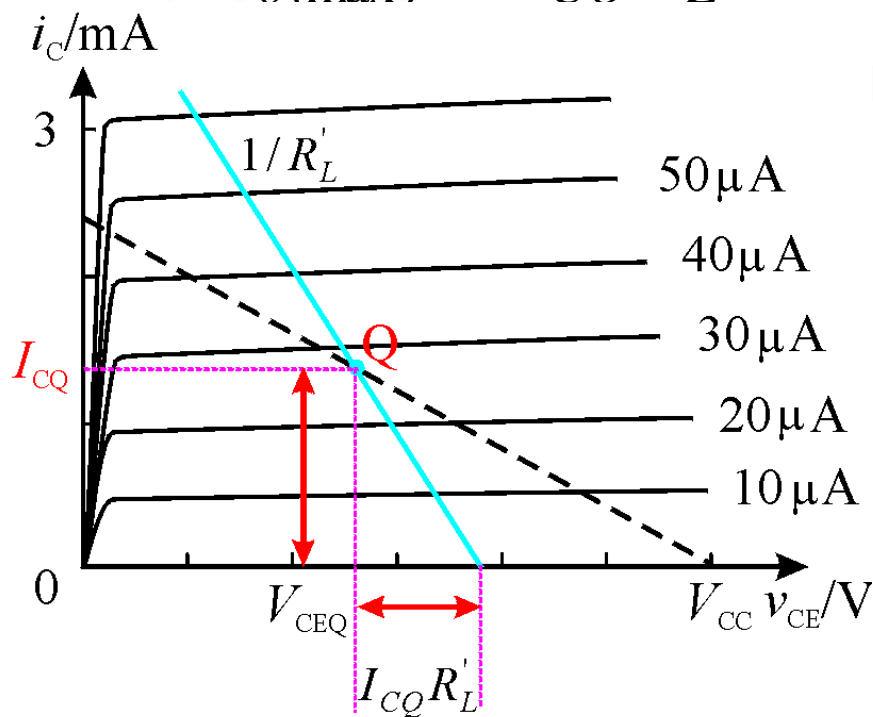
当Q点位置太**高**时，先出现**饱和失真**。这时最大不失真输出电压为：

$$V_{o(\max)} = V_{CEQ} - V_{CES}$$



当Q点位置太**低**时，先出现**截止失真**。这时最大不失真输出电压为：

$$V_{o(\max)} = I_{CQ} R'_L$$





$$I_{CQ} = 1.3 \text{ mA}$$

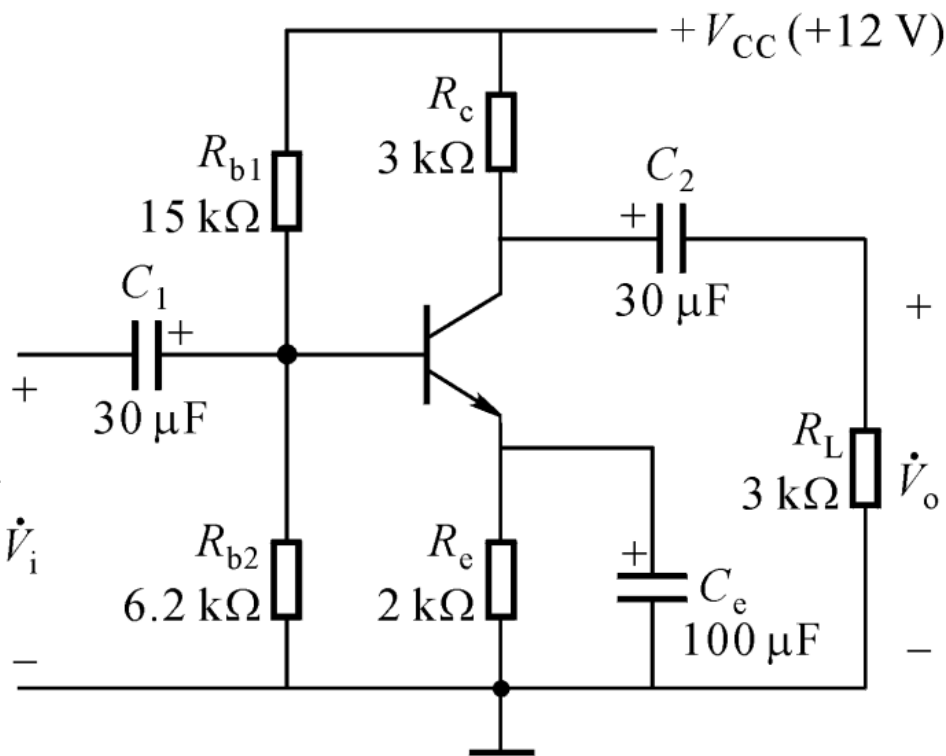
$$V_{CEQ} = 12 - 1.3 \times 5 = 5.5 \text{ V}$$

考虑截止失真时:

$$V_{om1} = I_{CQ} R'_L = 1.3 \times 1.5 = 1.8 \text{ V}$$

考虑饱和失真时:

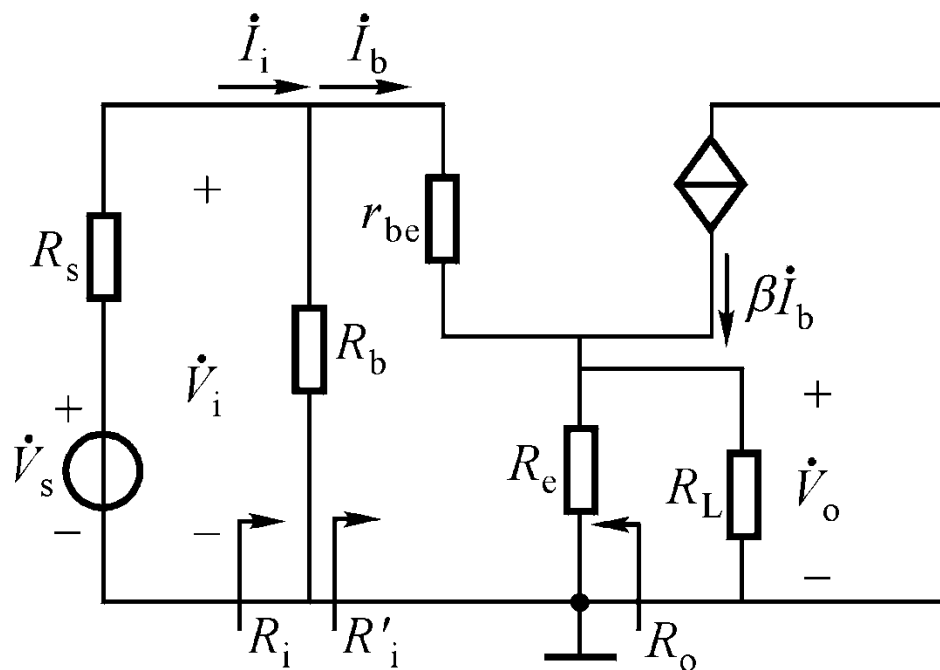
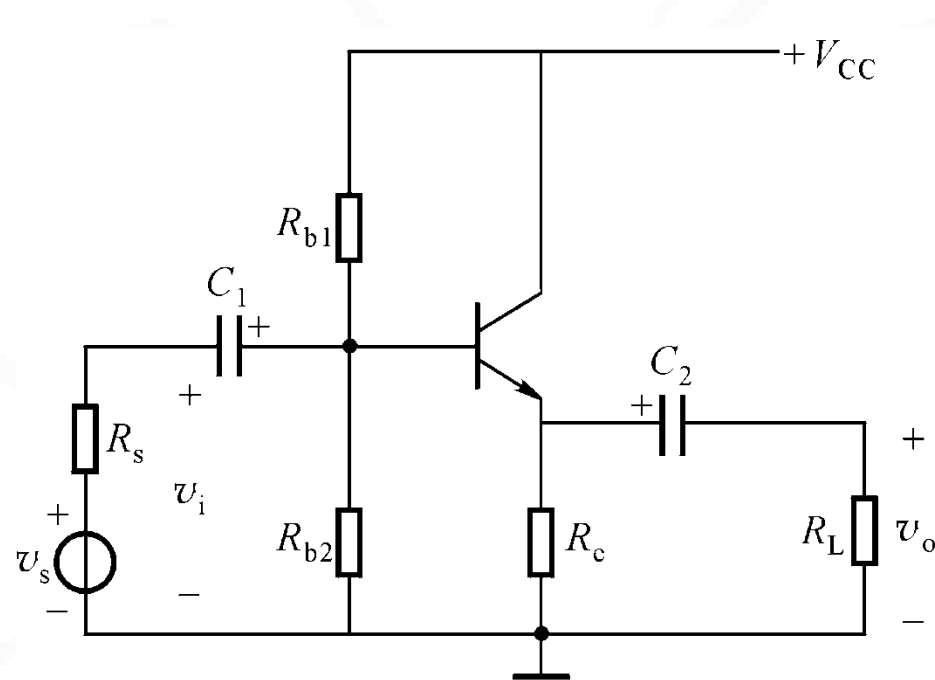
$$V_{om2} = V_{CEQ} - V_{CES} = 5.5 - 0.7 = 4.8 \text{ V}$$



所以, 先出现截止失真, 最大不失真输出电压为: $V_{om} = 1.8 \text{ V}$ 。



2、共集放大电路的动态分析



①求电压放大倍数：

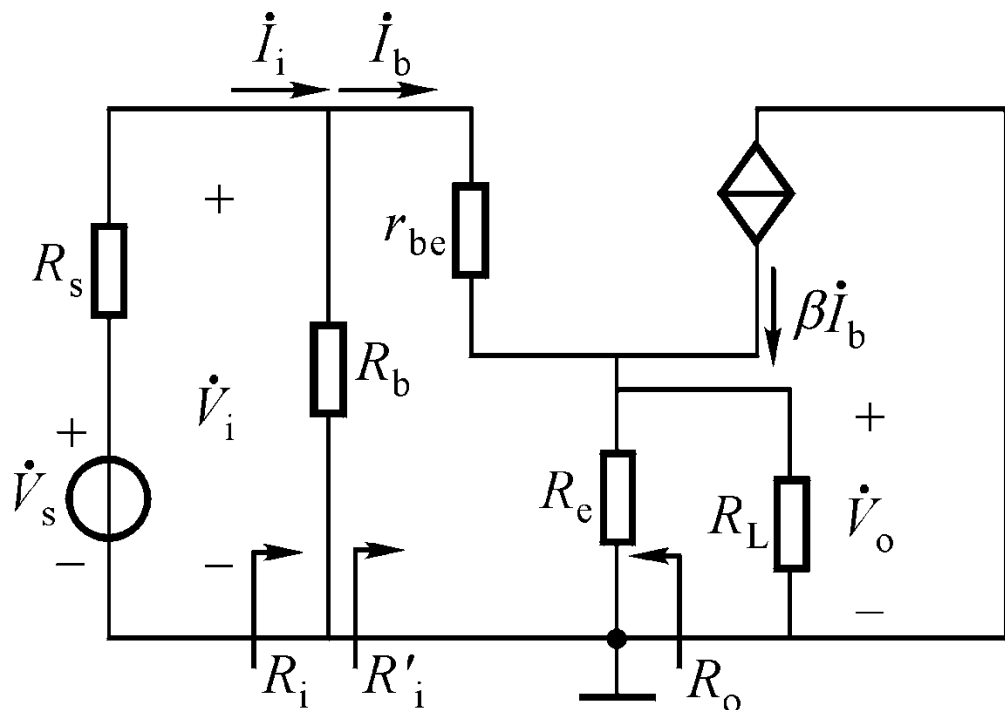
$$\dot{A}_v = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i} = \frac{(1 + \beta)R'_L}{r_{be} + (1 + \beta)R'_L} \leq 1$$

且 $\dot{A}_v \approx 1$

$$\dot{V}_o = \dot{I}_e R'_L = \dot{I}_b (1 + \beta) R'_L$$

$$\begin{aligned} \dot{V}_i &= \dot{I}_b r_{be} + \dot{I}_e R'_L \\ &= \dot{I}_b [r_{be} + (1 + \beta) R'_L] \end{aligned}$$

共集放大电路的电压放大倍数**小于1**且**近似为1**，又称为**射极跟随器**或**电压跟随器**。



② 计算输入电阻：

$$R'_i = \frac{\dot{V}_i}{\dot{I}_b} = r_{be} + (1 + \beta)R'_L$$

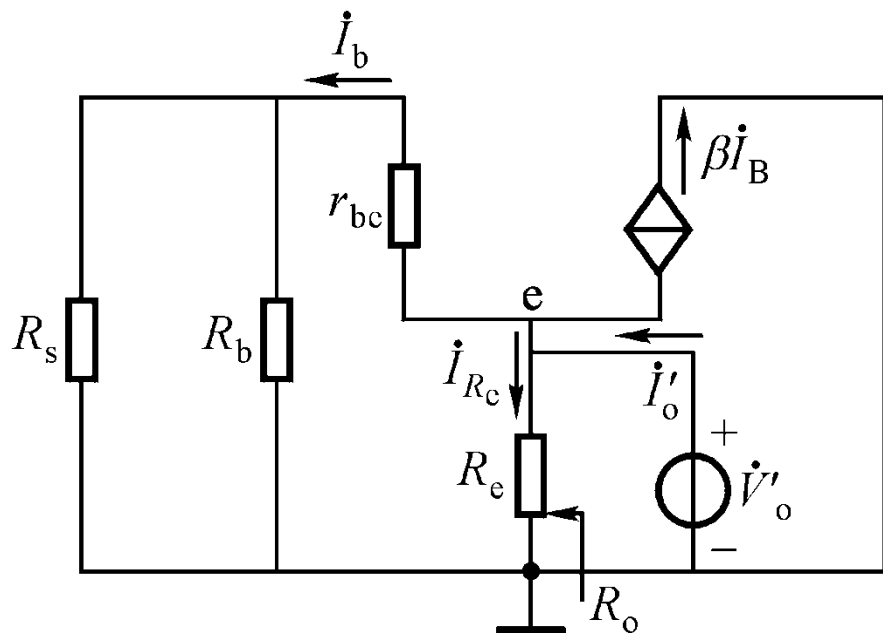
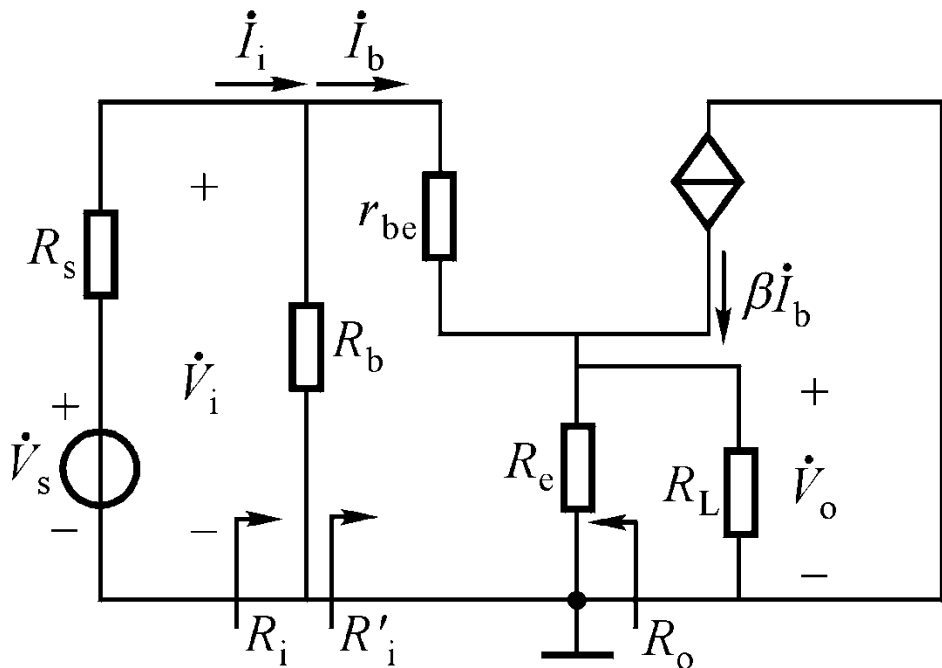
$$R_i = R_b // R'_i = R_b // [r_{be} + (1 + \beta)R'_L]$$



③ 计算输出电阻:

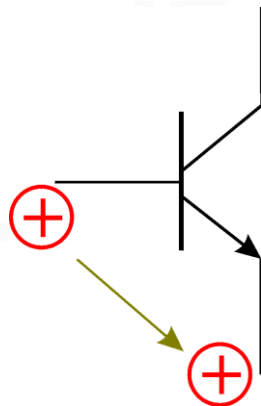
$$\begin{aligned} \dot{I}'_o &= \dot{I}_b + \beta \dot{I}_b + \dot{I}_{R_e} \\ &= (1 + \beta) \dot{I}_b + \dot{I}_{R_e} \\ &= (1 + \beta) \frac{\dot{V}'_o}{r_{be} + R_b // R_s} + \frac{\dot{V}'_o}{R_e} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_o &= \frac{\dot{V}'_o}{\dot{I}'_o} \\ &= \frac{\dot{V}'_o}{(1 + \beta) \frac{\dot{V}'_o}{r_{be} + R_b // R_s} + \frac{\dot{V}'_o}{R_e}} \\ &= R_e // \frac{r_{be} + R_b // R_s}{1 + \beta} \end{aligned}$$



➤ 共集放大电路的特点：

✧ 输出电压与输入电压的相位相同。



✧ 共集放大电路的电压放大倍数小于1且近似为1，
又称为**射极跟随器**。

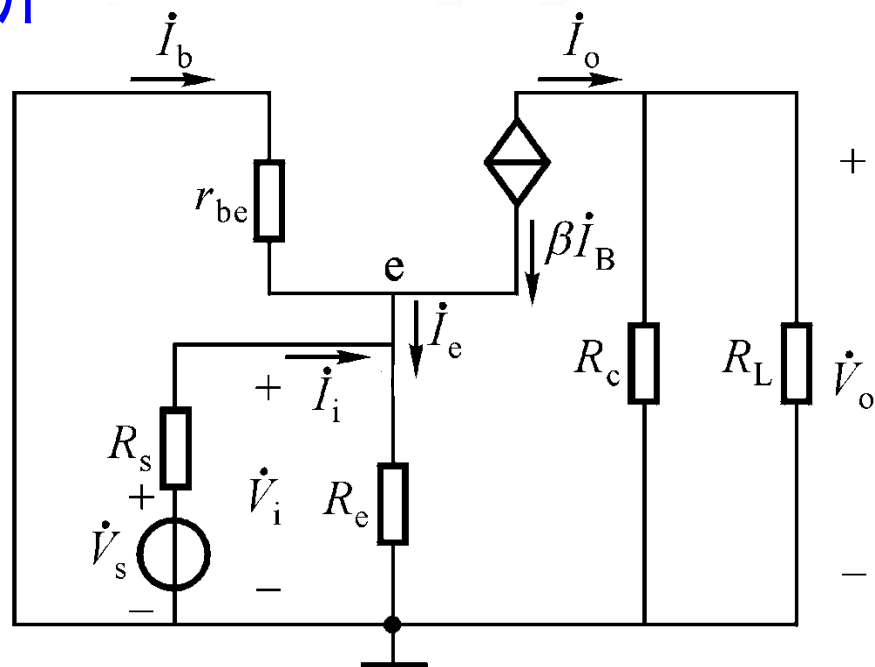
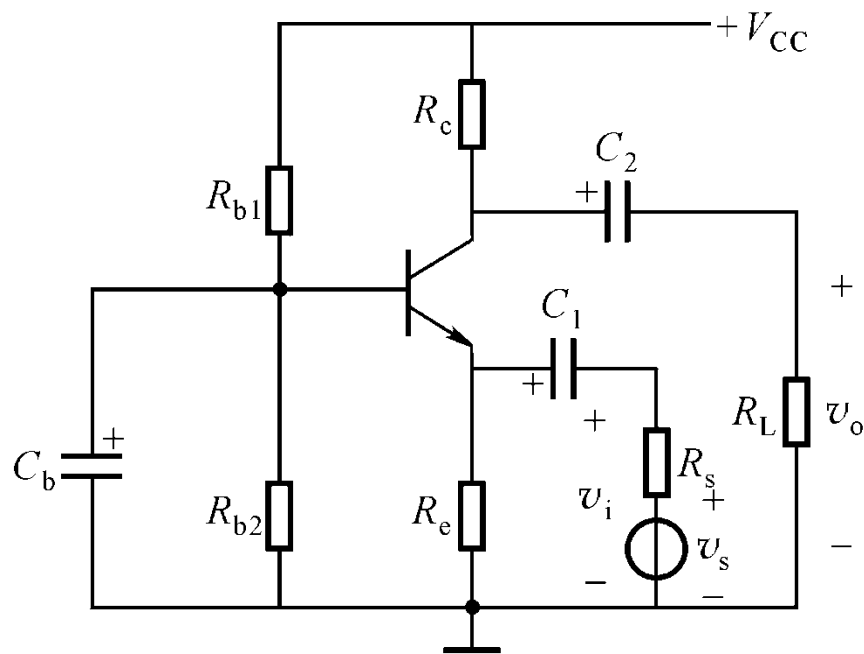
✧ 输入电阻高，输出电阻低。

✧ 共集放大电路虽然不放大电压，但能放大电流。

✧ 能起隔离、缓冲、阻抗变换作用。



3、共基放大电路的动态分析



①求电压放大倍数：

$$\dot{A}_v = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i} = \frac{-\beta \dot{I}_b R'_L}{-\dot{I}_b r_{be}} = \frac{\beta R'_L}{r_{be}}$$

②计算输入电阻：

$$R'_i = \frac{\dot{V}_i}{-\dot{I}_e} = \frac{-\dot{I}_b r_{be}}{-(1+\beta)\dot{I}_b} = \frac{r_{be}}{1+\beta}$$

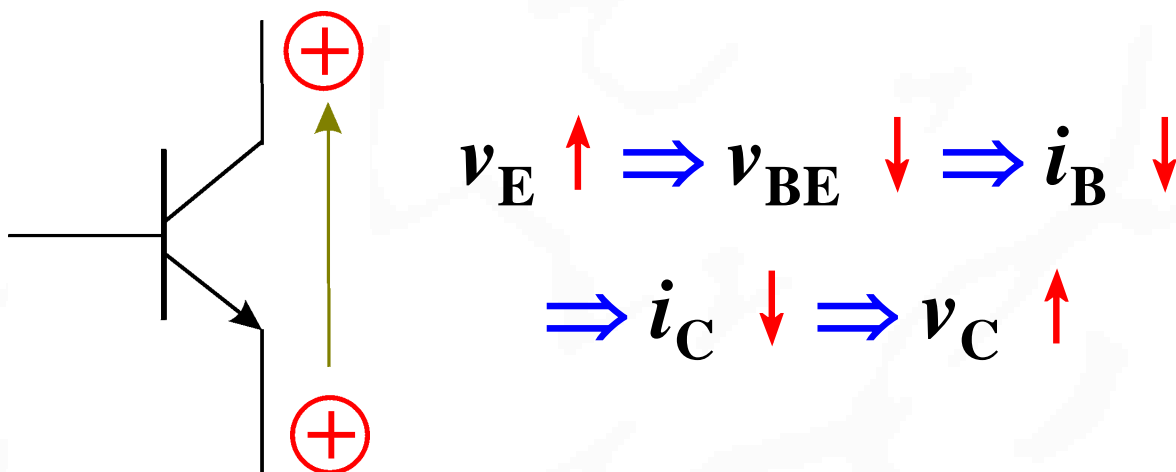
③计算输出电阻：

$$R_o \approx R_c$$

$$R_i = R_e // R'_i = R_e // \frac{r_{be}}{1+\beta}$$

➤ 共基放大电路的特点：

✧ 输出电压与输入电压的相位相同。



✧ 共基放大电路的电压放大倍数也较大。

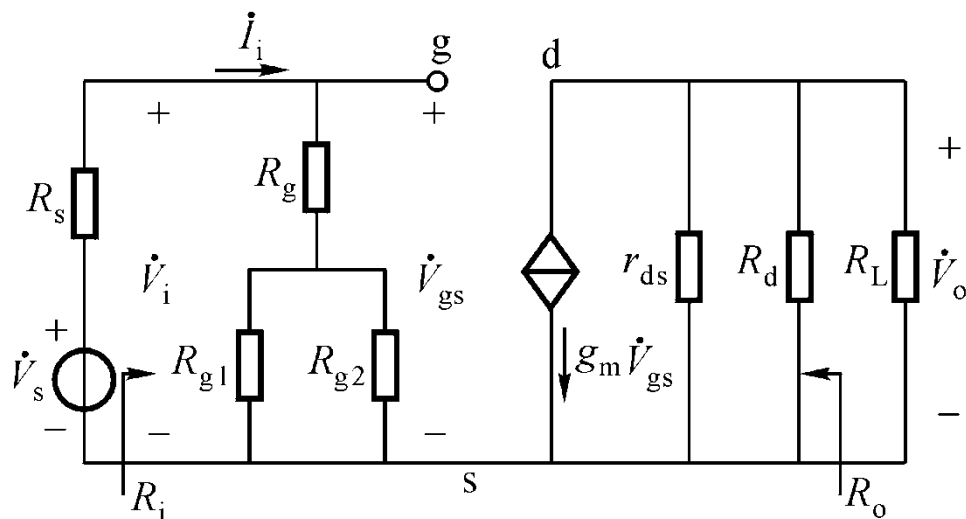
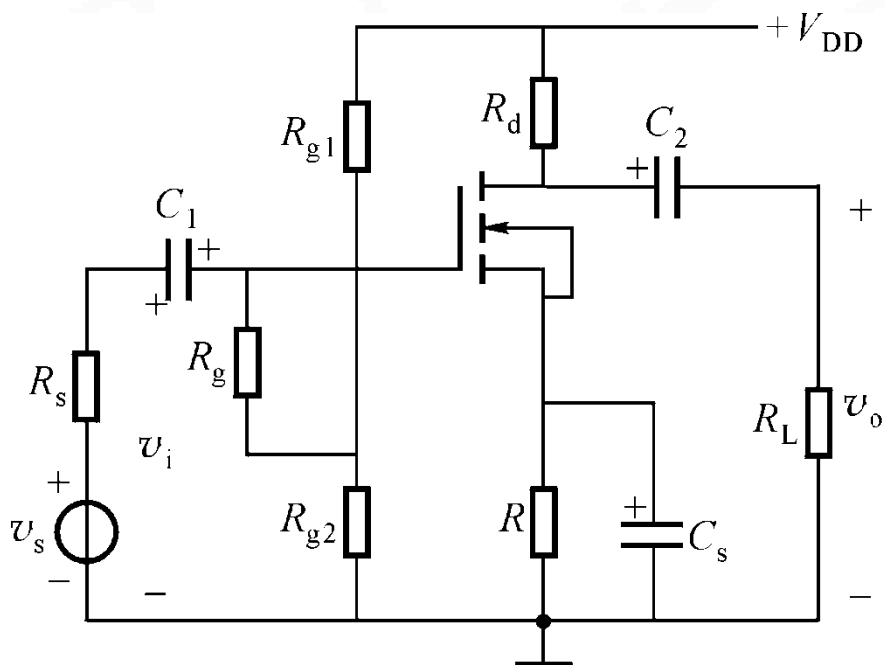
✧ 输入电阻较小，输出电阻较大。

✧ 共基放大电路的优点是**频率特性好**，常用在宽频电路、高频电路中。



四、FET放大电路的动态分析

共源 (CS) 放大电路



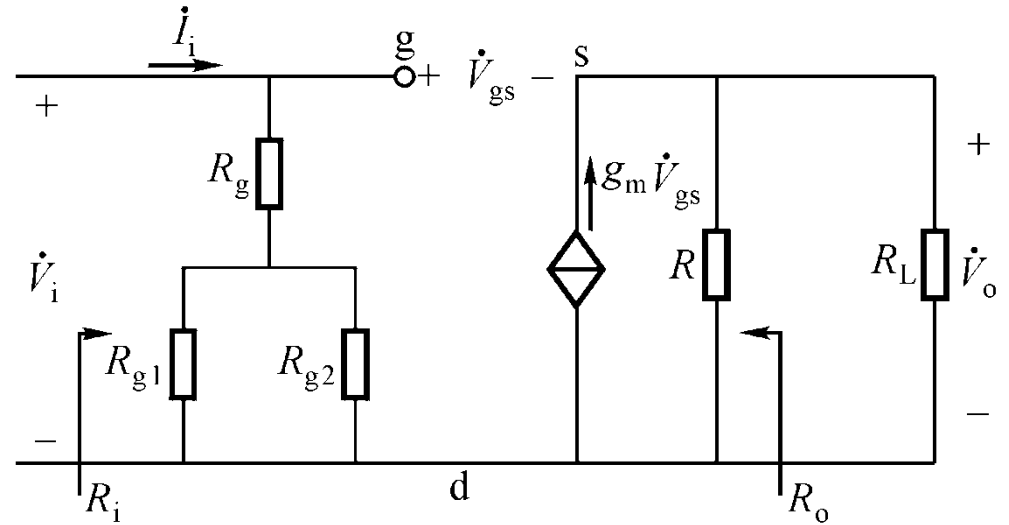
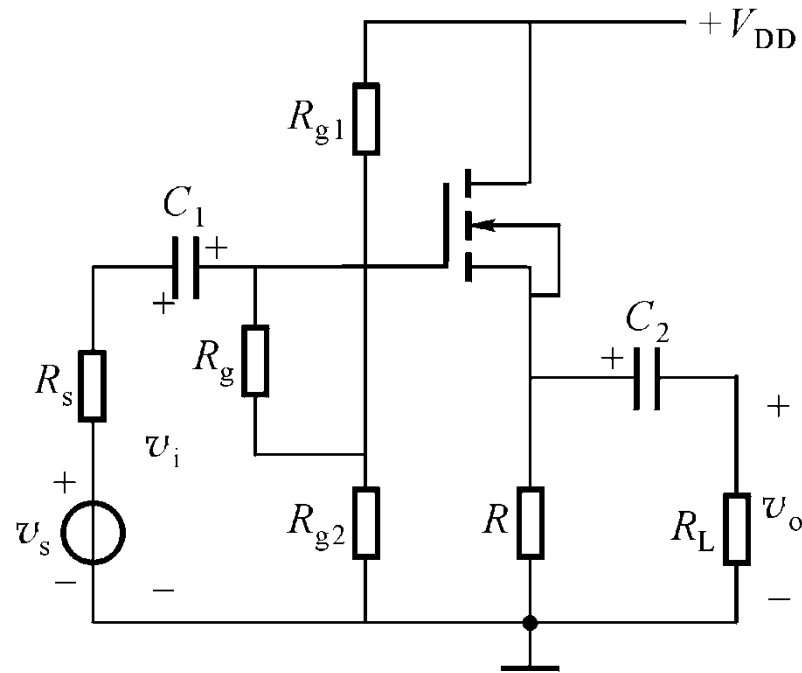
$$\dot{A}_v = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i} = \frac{-g_m \dot{V}_{gs} R'_L}{\dot{V}_{gs}} = -g_m R'_L$$

$$R_i = \frac{\dot{V}_i}{\dot{I}_i} = R_g + R_{g1} // R_{g2}$$

$$R_o = \left. \frac{\dot{V}'_o}{\dot{I}'_o} \right|_{\substack{\dot{V}_s=0 \\ R_L=\infty}} = R_d // r_{ds} \approx R_d$$



共漏 (CD) 放大电路

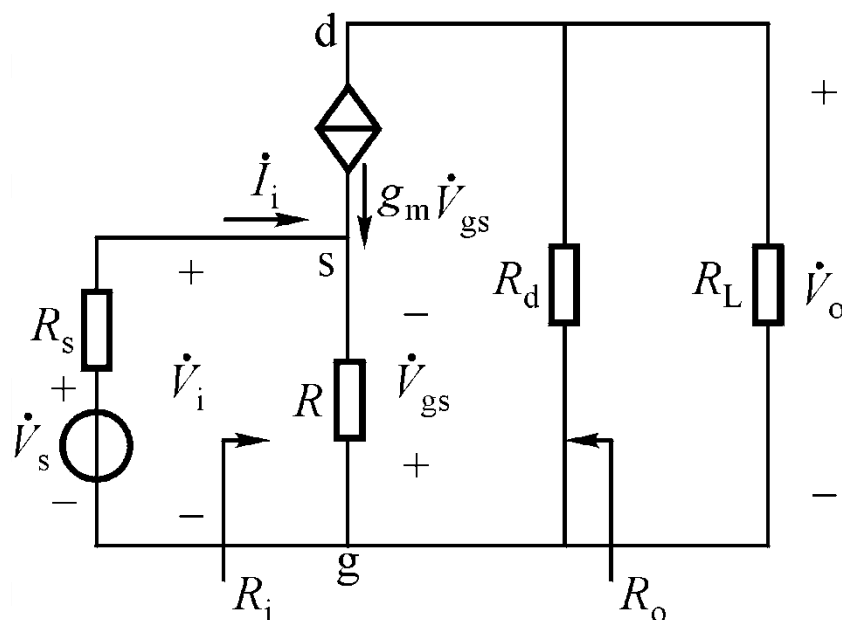
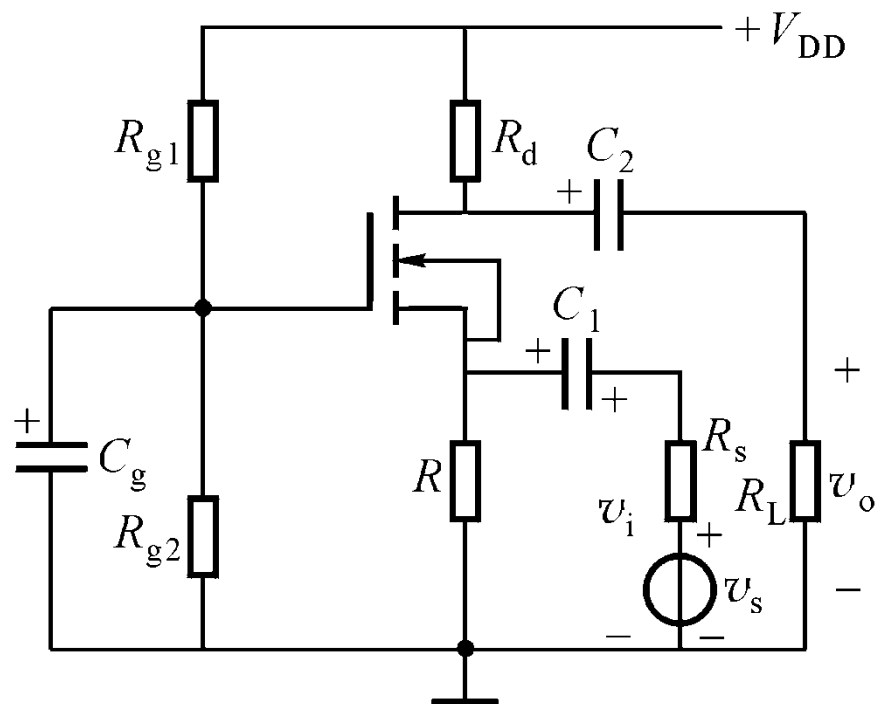


$$\dot{A}_v = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i} = \frac{g_m \dot{V}_{gs} R'_L}{\dot{V}_{gs} + g_m \dot{V}_{gs} R'_L} = \frac{g_m R'_L}{1 + g_m R'_L} \approx 1 \quad R_i = R_g + R_{g1} // R_{g2}$$

$$R_o = \left. \frac{\dot{V}'_o}{\dot{I}'_o} \right|_{\substack{\dot{V}_s=0 \\ R_L=\infty}} = \frac{\dot{V}'_o}{-g_m \dot{V}_{gs} + \frac{\dot{V}'_o}{R}} = \frac{\dot{V}'_o}{g_m \dot{V}'_o + \frac{\dot{V}'_o}{R}} = \frac{1}{g_m + \frac{1}{R}} = R // \frac{1}{g_m}$$



共栅 (CG) 放大电路



$$\dot{A}_v = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i} = \frac{-g_m \dot{V}_{gs} R'_L}{-\dot{V}_{gs}} = g_m R'_L$$

$$R_o = \left. \frac{\dot{V}'_o}{\dot{I}'_o} \right|_{\substack{\dot{V}_s=0 \\ R_L=\infty}} = R_d$$

$$R_i = \frac{\dot{V}_i}{\dot{I}_i} = \frac{-\dot{V}_{gs}}{-\frac{\dot{V}_{gs}}{R} - g_m \dot{V}_{gs}} = \frac{1}{\frac{1}{R} + g_m} = R // \frac{1}{g_m}$$



➤ 小结与讨论：FET与三极管放大电路的比较

- ✧ CS对应于CE；CD对应于CC；CG对应于CB。
- ✧ 由于场效应管的 g_m 比三极管对应的 $g_m(=\beta/r_{be})$ 要小，因此场效应管放大电路的放大能力不如三极管放大电路
- ✧ 场效应管放大电路的突出优点是输入电阻高，噪声低，温度稳定性好，易于集成化。
- ✧ 分立元件放大电路通常由三极管组成，集成电子电路由场效应管或三极管构成。



五、三种组态放大电路性能指标的比较

	电压增益	输入电阻	输出电阻	特 点	用 途
共射 (CE)	反相， 电压增益大	较大 (几千欧)	较大 (R_c)	既有电压放大和电流放大作用	应用广泛， 中间级
共集 (CC)	同相， 近似为 1	最大	最小	输入电阻高、输出电阻低	阻抗变换 或电流放大
共基 (CB)	同相， 电压增益较大	最小 (几十欧)	较大 (R_c)	频率特性好	宽频或高频放大电路



本节重点提示:

- ✧ 理解放大电路的工作原理和性能指标，掌握符号表示，会画直流通路和交流通路。
- ✧ 掌握图解分析方法，会画直流和交流负载线，会计算最大不失真输出电压。
- ✧ 理解三极管和FET典型的直流偏置电路（电路型式、特点），会从直流通路分析给定电路能否放大，会计算三极管放大电路的静态工作点。
- ✧ 会推导三种组态放大电路的性能指标公式。
- ✧ 理解三种组态放大电路的特点（同相/反相、指标特点、应用场合）。



作业：

题1.1

题1.4

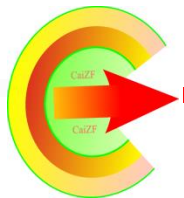
题1.7 图(a)

题1.9 图(b) (c)

题1.12



Thank you for your attention



蔡忠法

Ver3.5

浙江大学电工电子教学中心

版权所有©

2019年